



电子线路  
分析与设计

# 第 13 讲 放大电路分析

陈江  
2023.11.1

# 增益：示例

$$R_{i2} = r_b + (r_e + R_4) \cdot (1 + \beta)$$

$$I_B = V_S / R_{i2}$$

$$I_C = \beta I_B = \beta V_S / R_{i2}$$

$$V_{RL} = -(R_3 // R_L) \cdot \beta V_S / R_{i2}$$

$$R_{i2} = r_b + (r_e + R_4 // R_L) \cdot (1 + \beta)$$

$$I_B = U_S / R_{i2}$$

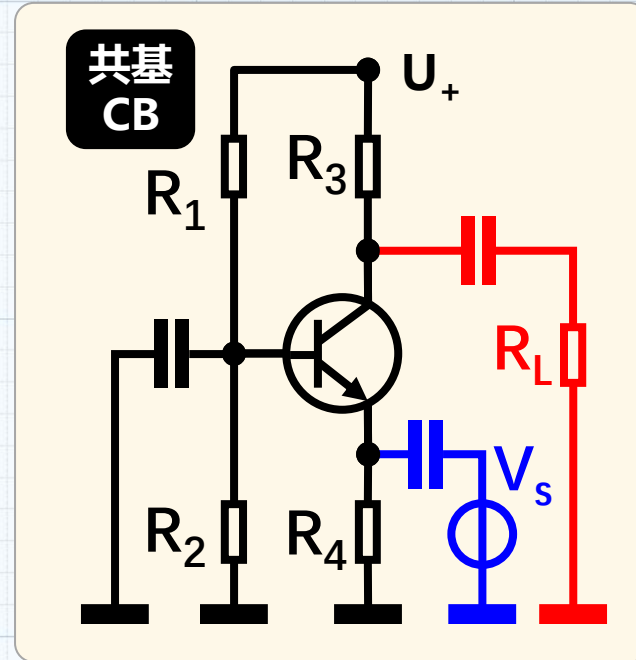
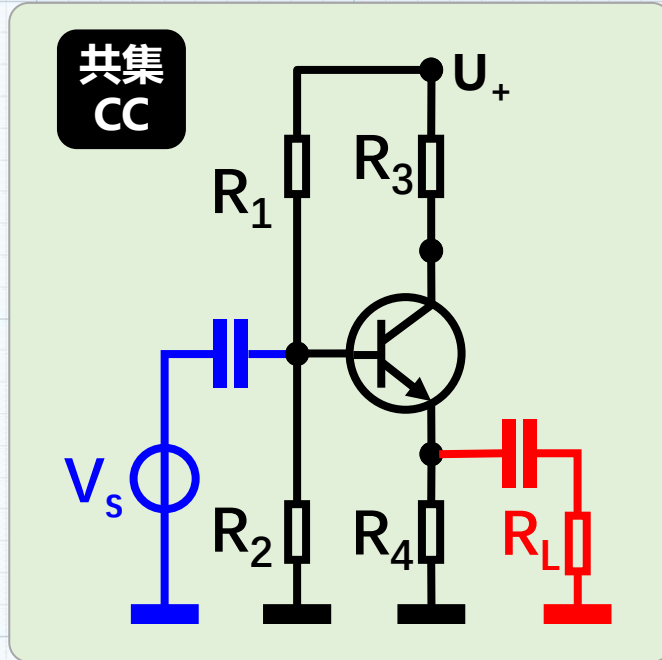
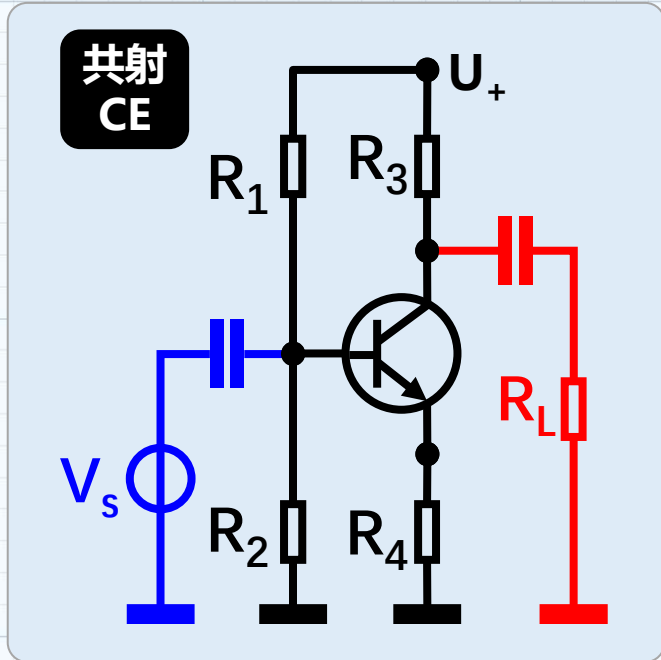
$$I_E = (1 + \beta) I_B = (1 + \beta) V_S / R_{i2}$$

$$V_{RL} = (R_4 // R_L) \cdot (1 + \beta) V_S / R_{i2}$$

$$R_{i2} = r_e + r_b / (1 + \beta)$$

$$I_C = -\beta V_S / R_{i2} (1 + \beta)$$

$$V_{RL} = (R_3 // R_L) V_S / R_{i2}$$



① 哪种用得最多？

$A_V$

② 为什么？

主要用  $V(t)$  为信号  
→ 电压模电路

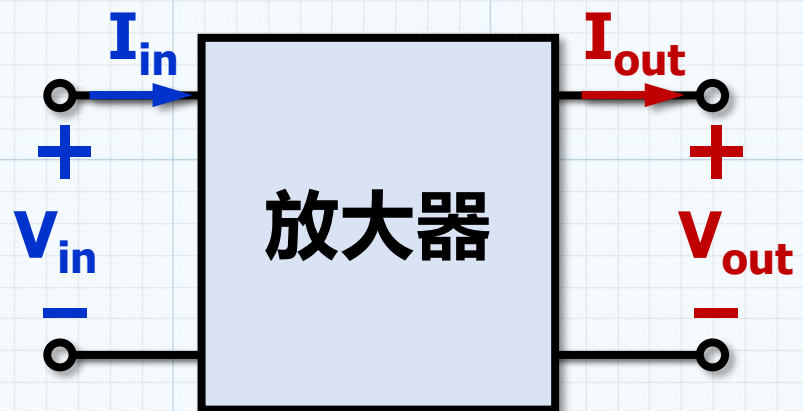
③ 为什么？

放大器件为压控...  
便于后级接受  
便于测量  
便于分支  
电路功耗易控  
...

④ 另三种有用么？

有。虽然相对少些...

## 增益：定义



电压  
增益

$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

电流  
增益

$$A_I = \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

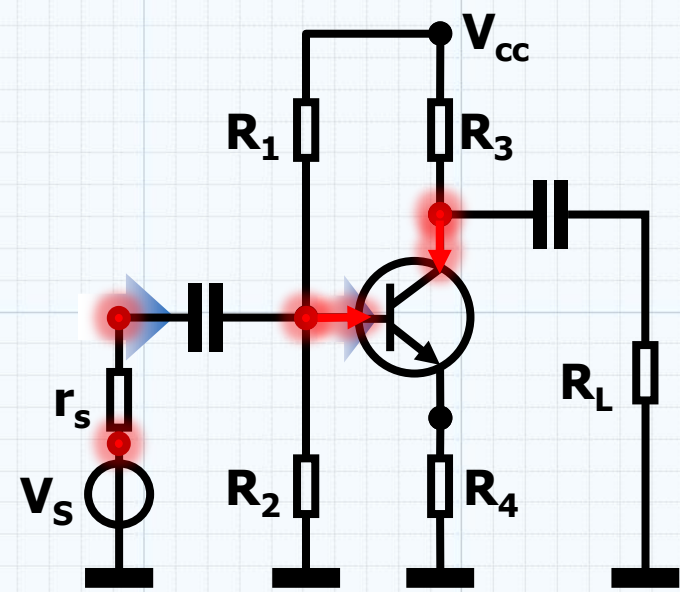
跨阻  
增益

$$A_R = \frac{V_{out}}{I_{in}}$$

跨导  
增益

$$A_G = \frac{I_{out}}{V_{in}}$$

# 增益：定义



电压  
增益

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

## ? $A_v$ : 如何好算 ?

若各处阻抗易估算  
→ 循信号路径推算 ...

若各处阻抗不易估算  
→ 动态等效电路：方程组  
→ 作图法  
→ 仿真 | 数值解法  
→ 套用公式

## ? $A_v$ : 如何算好 ?

- 比较大
- 对负载不敏感
- 对源不敏感
- 用于各种频率
- 用于较大信号
- 能效高
- 比较稳定
- 准确可靠
- 可以调节
- 可以连续调节
- 可以数字调节
- 可以自动调节
- ...

→  $R_o$   
→  $R_i$   
→  $f_L f_H$   
→ 失真  
→ 效率

根据  
场景  
而定

增益

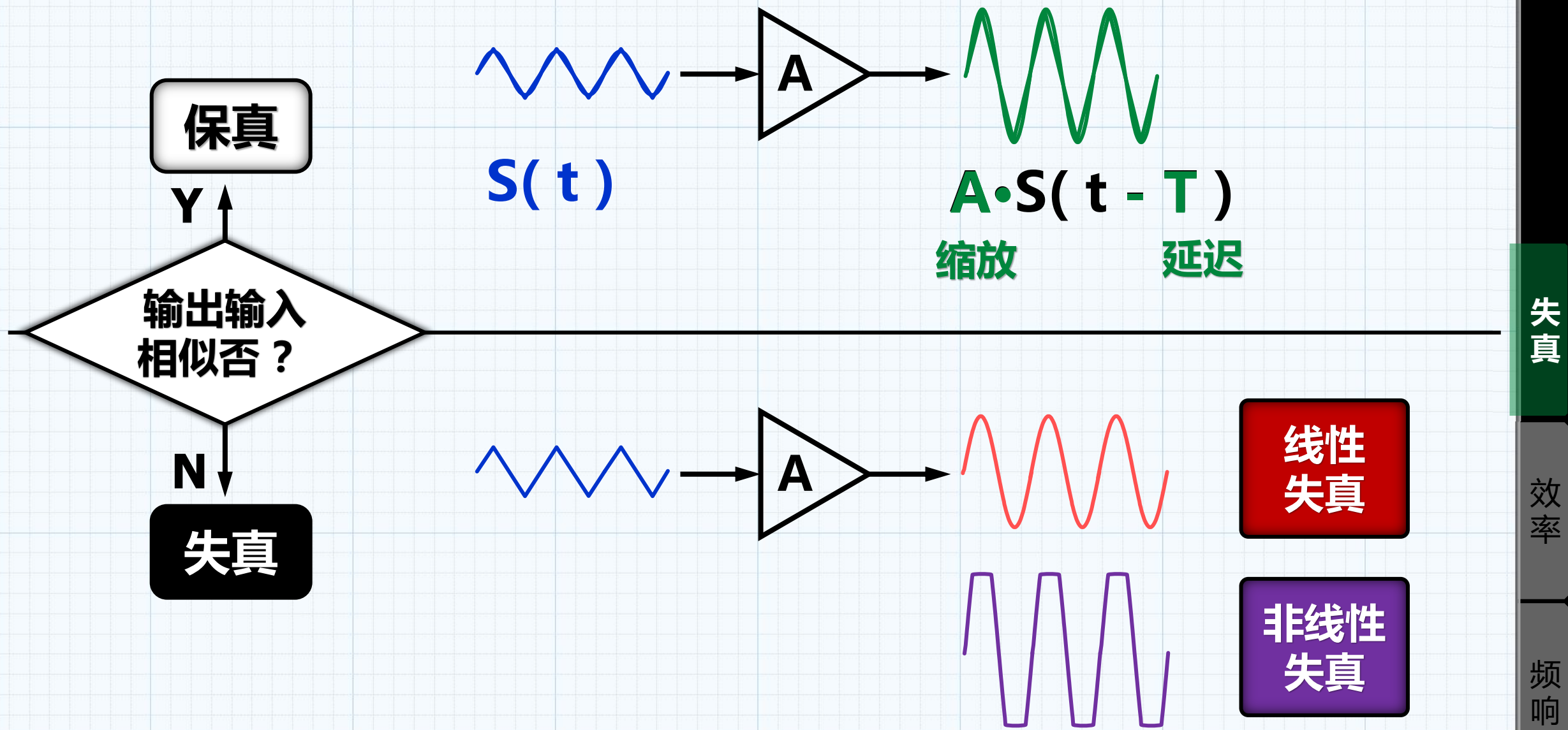
失真

效率

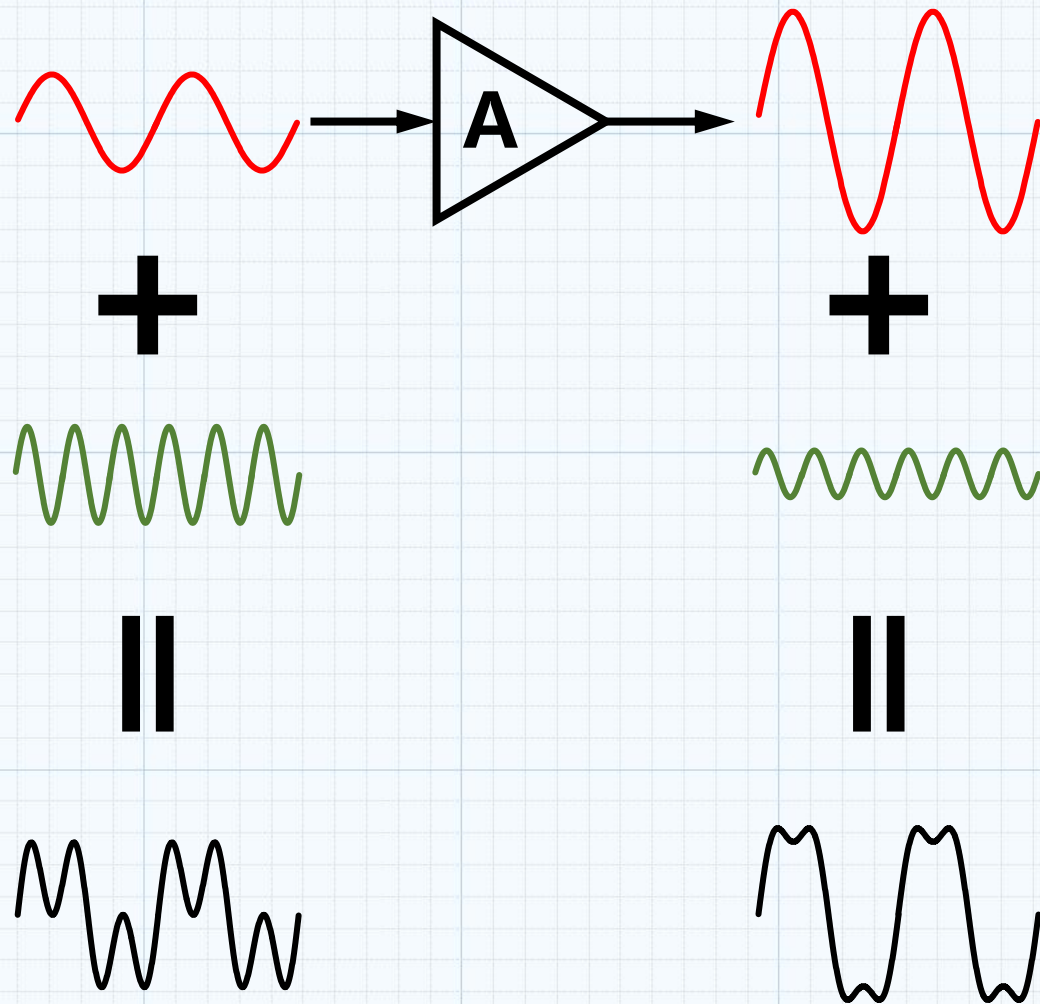
频响



## 失真：类别



# 失真：线性失真



❓ 线性失真的本质？

歧视：选择性区别对待

❓ 线性失真一定坏？

未必

譬如：滤波器

❓ 放大器呢？

不同频率 → 不同增益

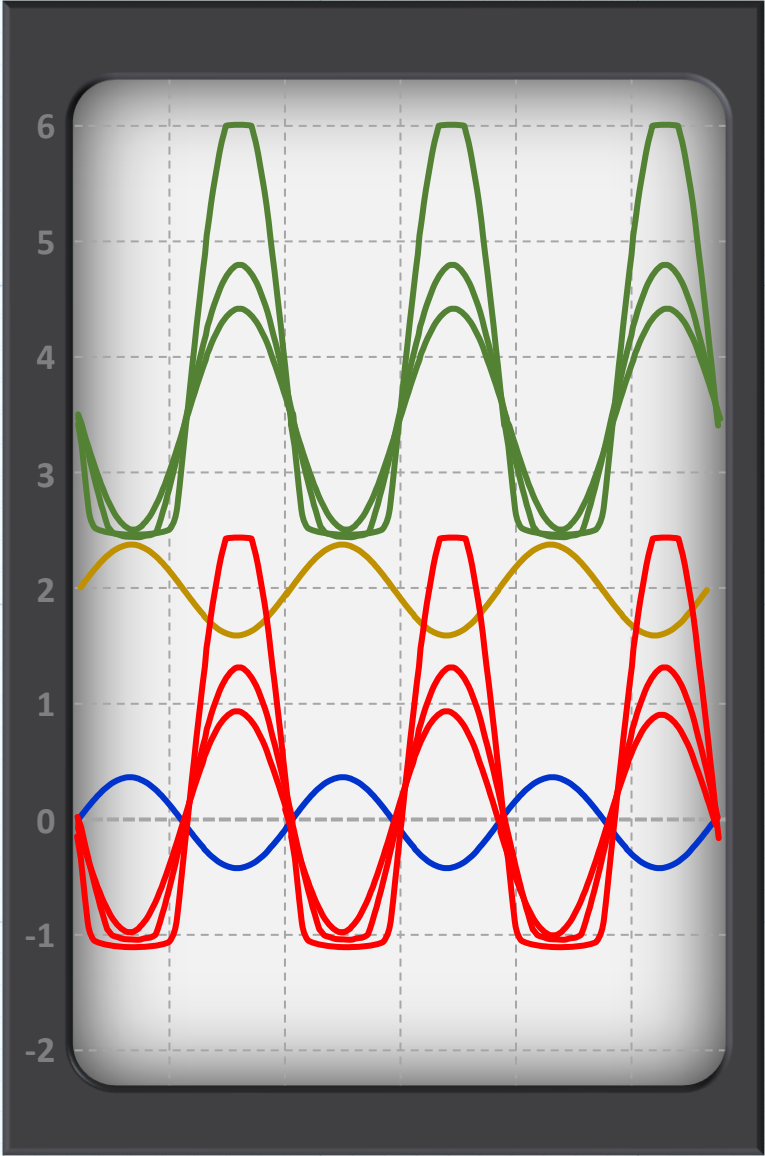
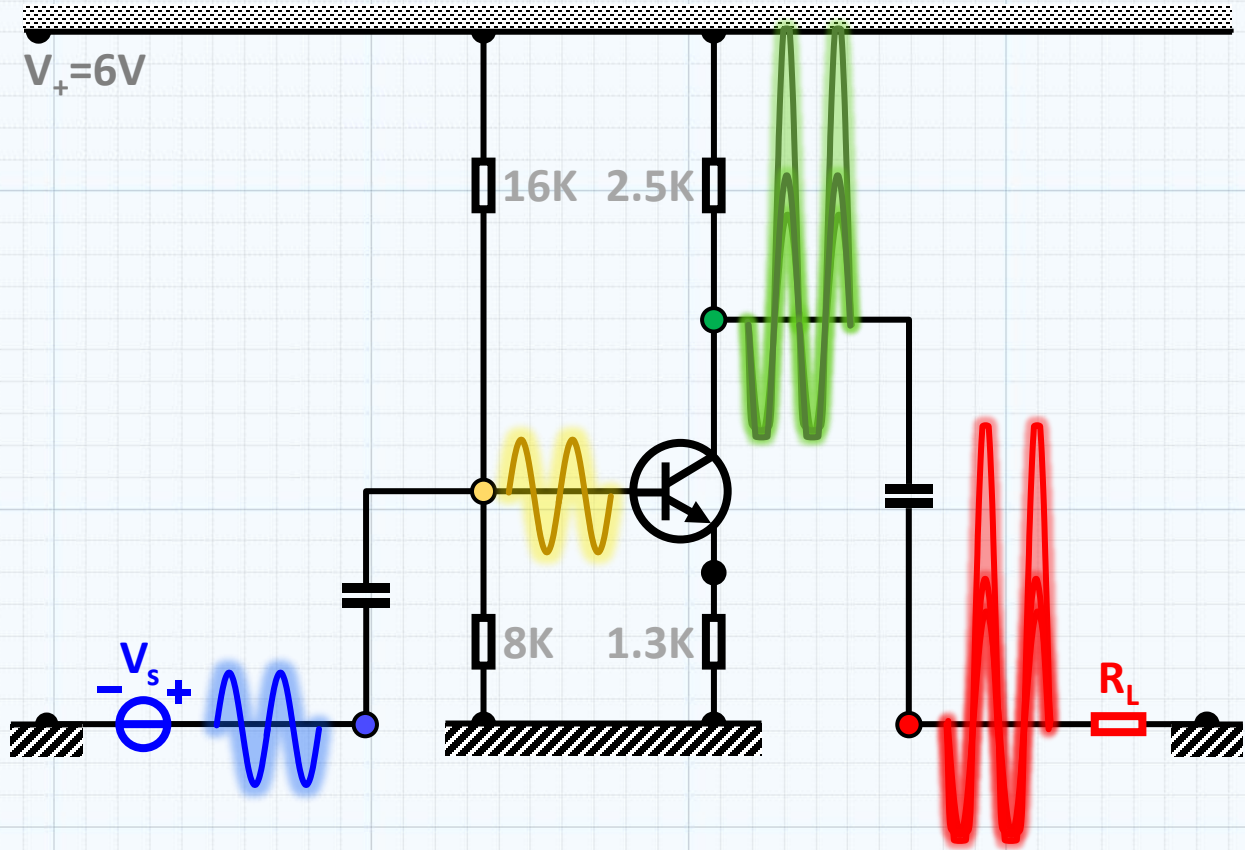
不同频率 → 不同相移

❓ 一定会线性失真？

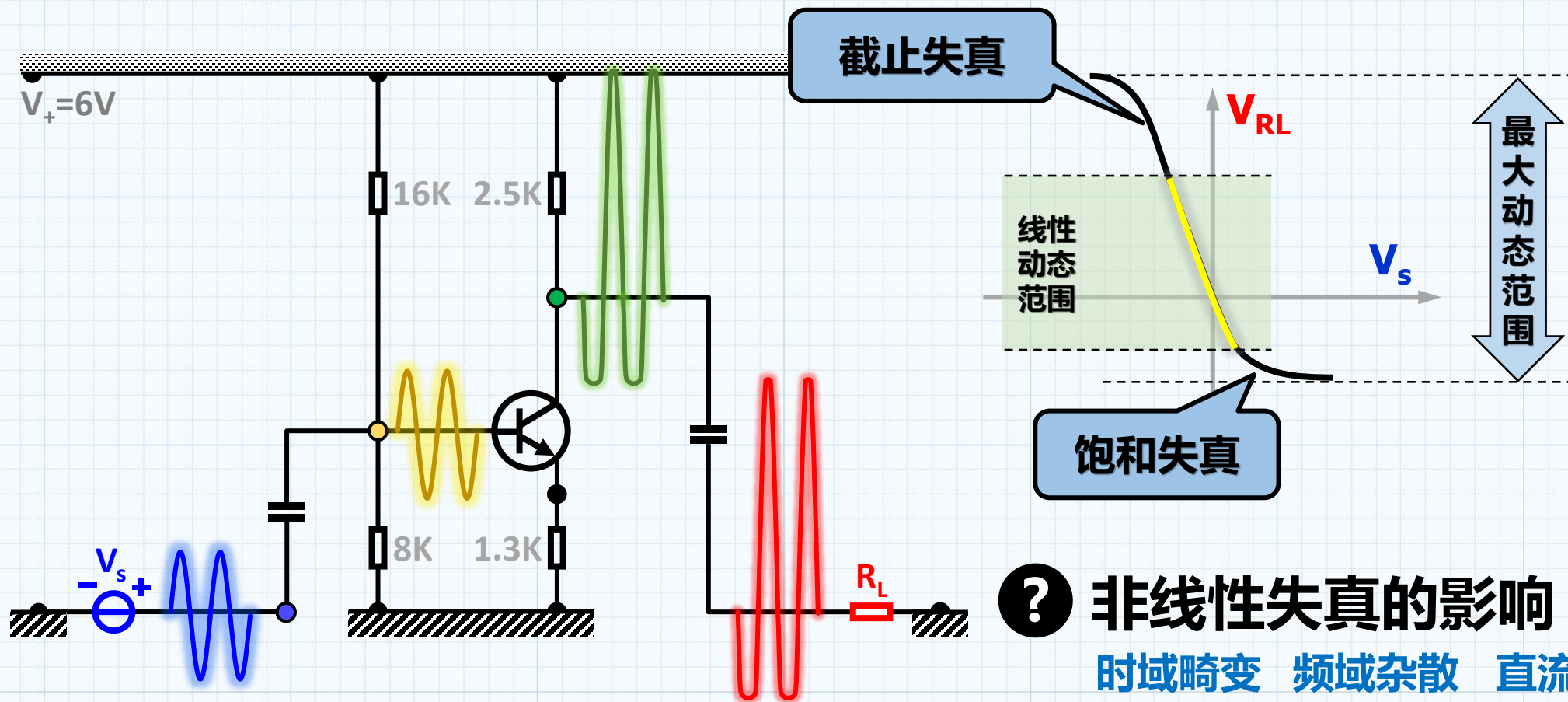
若：单频信号 → 不会

若：有一定宽度通频带

# 失真：非线性失真



# 失真：非线性失真



## ? 非线性失真的本质？

1. 转移特性具有非线性
2. 信号幅度过大

→ 超出线性动态范围

## ? 非线性失真的影响？

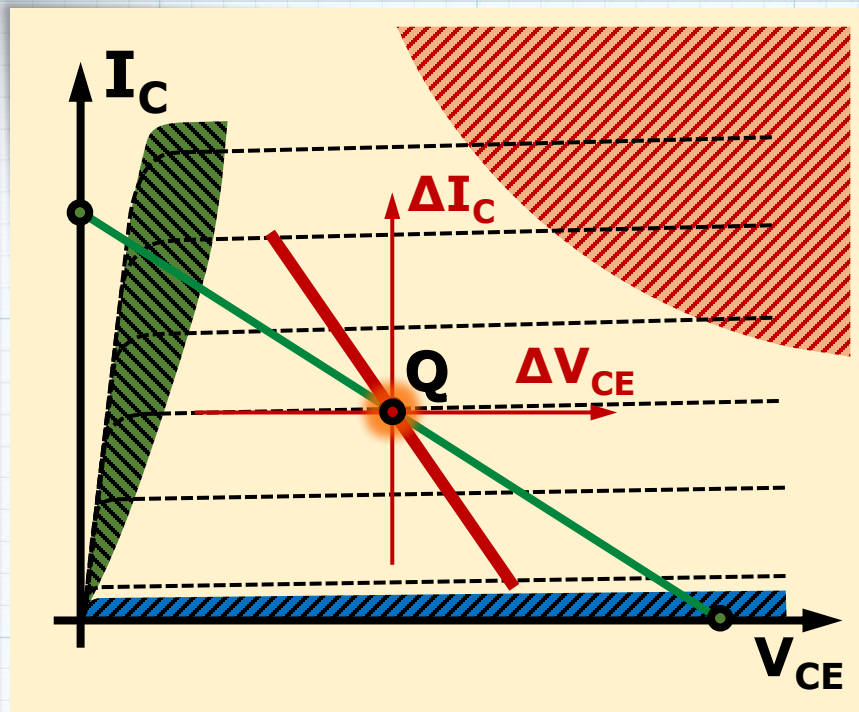
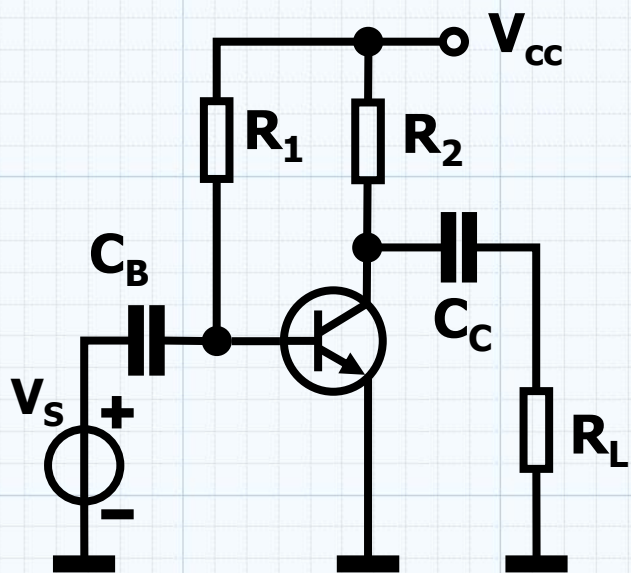
时域畸变 频域杂散 直流偏移

## ? 如何控制非线性失真？

1. 信号幅度勿过大
2. 设置合适的静态工作点



# 失真：图示



? 两线分离的原因？

直流和交流通路有差异  
动态器件的存在

? 失真和动态范围？

截止区：  $I_C \approx 0$

饱和区：  $V_C < V_B$

过载区：  $V_{CE} \times I_C$  过大

? 动态范围最大化？

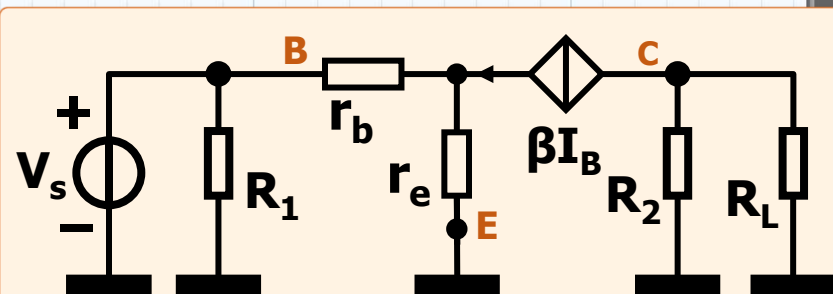
Q 的选择

直流负载线

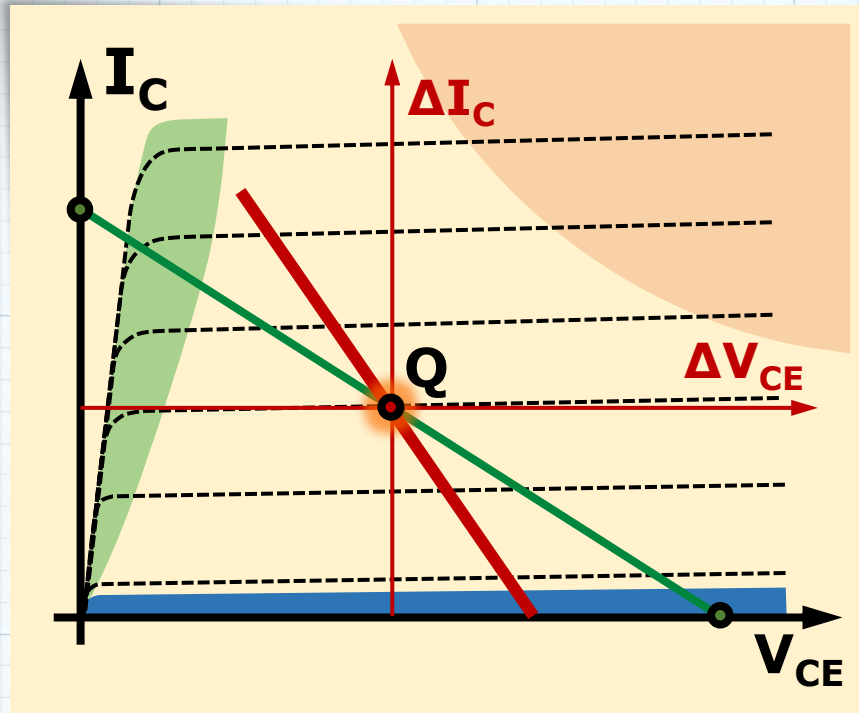
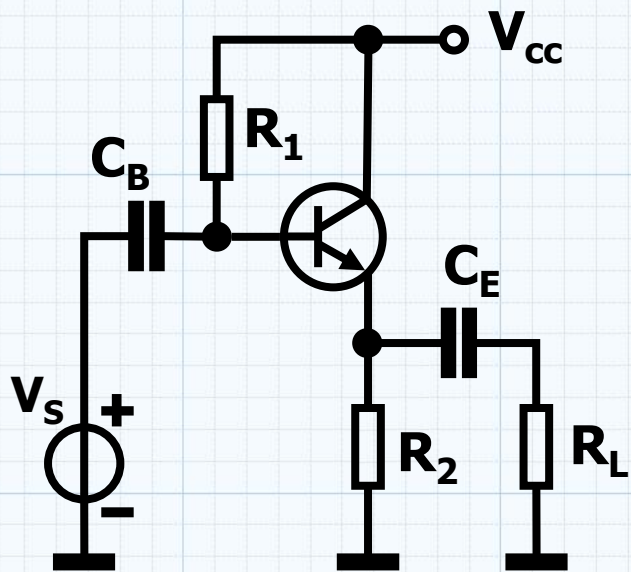
$$I_C \approx (V_{CC} - V_{CE}) / R_2$$

交流负载线

$$\Delta I_C = - \Delta V_{CE} / (R_2 \parallel R_L)$$



# 失真：图示



? 跟 CE 相仿?

负载线一样并不奇怪  
振动幅度差别可能很大

? 失真和动态范围 ?

截止区:  $I_C \approx 0$   
饱和区:  $V_C < V_B$   
过载区:  $V_{CE} \times I_C$  过大

? 如何定量描述 ?

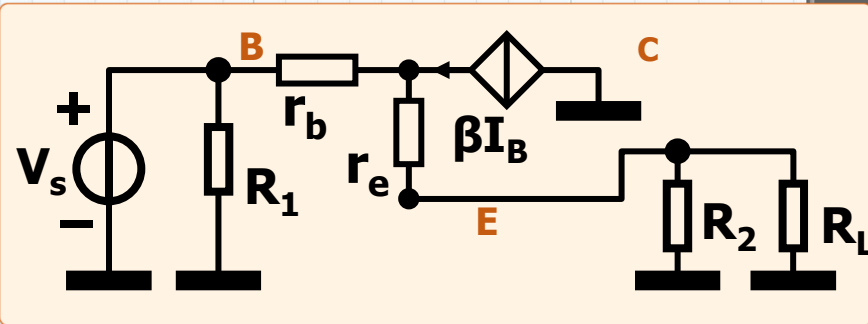
.....

直流负载线

$$V_{CE} = V_{CC} - (I_{CC} R_2 + V_{CE})$$

交流负载线

$$\Delta I_C = - \Delta V_{CE} / (R_2 \parallel R_L)$$



# 失真：定量描述与测量

☑ 与信号的幅度、波形、统计特征有关

测量时  
严格限定条件

计算时  
基本难以计算

## 总谐波失真 THD

Total Harmonic Distortion

① 正弦波激励

$$THD = \sqrt{\frac{\text{谐波总功率}}{\text{基波功率}}}$$

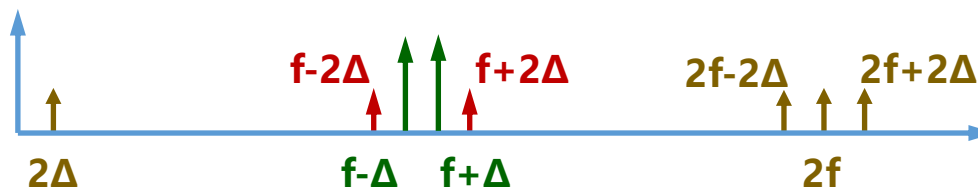
① 便于频谱仪观测

## 三阶交调 $IP_3$

Third-Order Intercept

① 双正弦  $f \pm \Delta$  输入

① 三阶交调量  $f \pm 2\Delta$  达信号功率



## 摆率 SR

Slew-Rate

① 阶跃|方波激励

$$SR = \max \left| \frac{dV_o}{dt} \right|$$

① 便于示波器观测

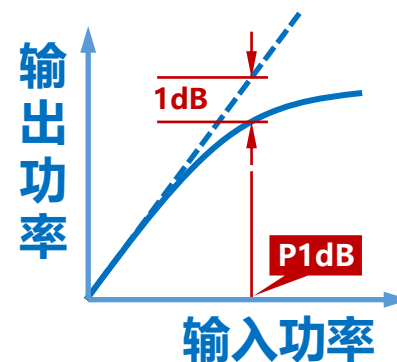
## 1dB压缩点 $P_{1dB}$

1-dB compression point

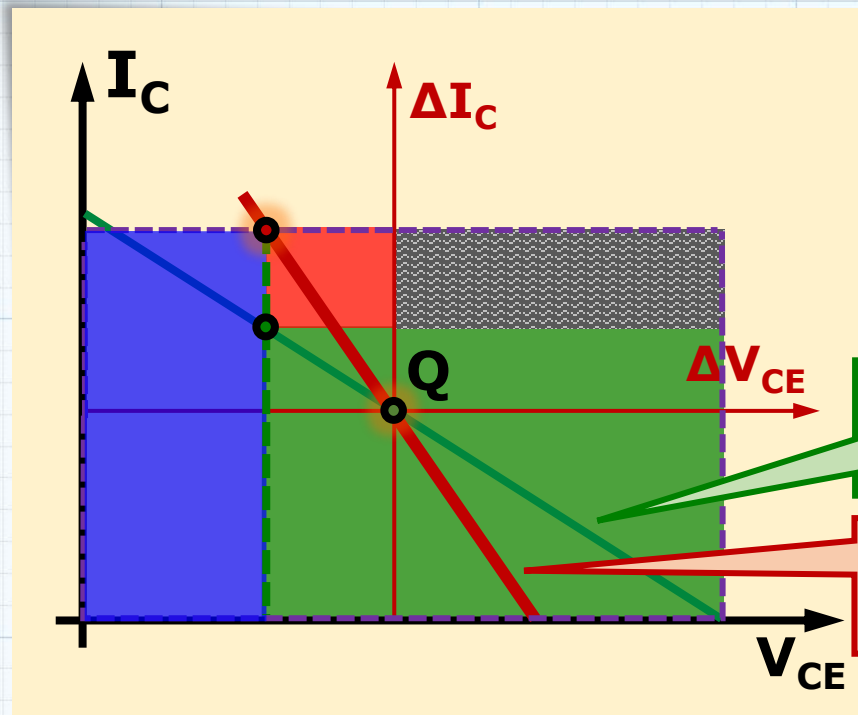
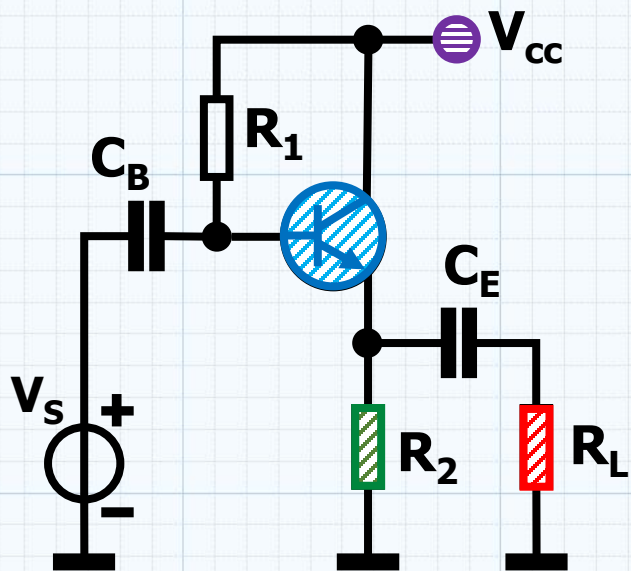
① 正弦波激励

①  $P_o$  亏损1dB时的输入功率值

① 一般会“回退”



# 效率：图示



?  $R_L$  功率好可怜?

是的!

存在改进办法

|斜率| =  $1/R_2$

|斜率| =  $1/(R_2 \parallel R_L)$

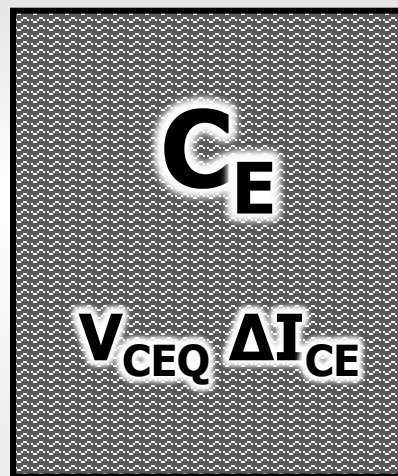
## 各元件功率

$$V_{CC} \approx V_{CC} \times I_C = V_{CC} \times (I_{CQ} + \Delta I_C)$$

$$BJT \approx V_{CE} \times I_C = (V_{CEQ} + \Delta V_{CE}) \times (I_{CQ} + \Delta I_C)$$

$$R_2 = V_{R2} \times I_{R2} = (V_{R2Q} + \Delta V_{R2}) \times (I_{R2Q} + \Delta I_{R2})$$

$$R_L = V_{RL} \times I_{RL} = (0 + \Delta V_{RL}) \times (0 + \Delta I_{RL})$$

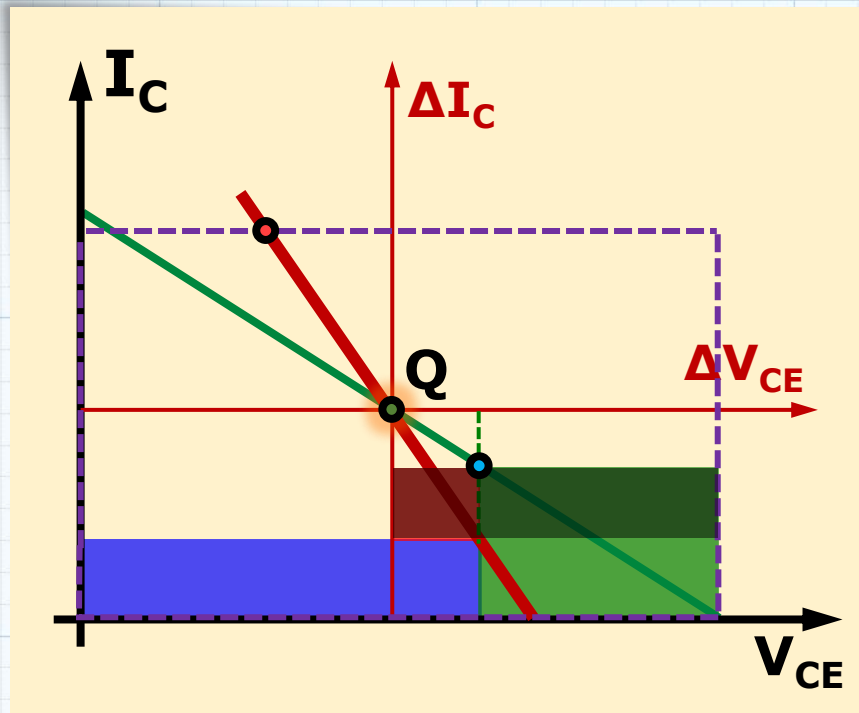
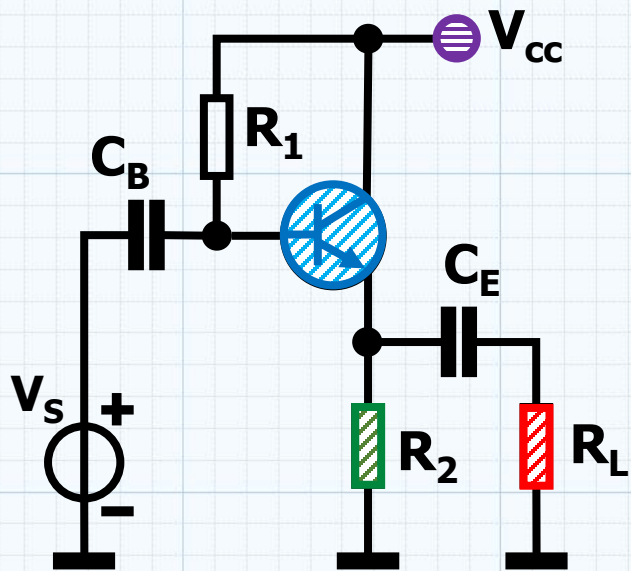


效率

频响



# 效率：图示



?  $R_L$  功率仍可怜?!!

存在改进办法

?  $C_E$  功耗比较特殊

半周期正；半周期负  
平均功耗为 0

## 各元件功率

$$V_{CC} \approx V_{CC} \times I_C = V_{CC} \times (I_{CQ} + \Delta I_C)$$

$$BJT \approx V_{CE} \times I_C = (V_{CEQ} + \Delta V_{CE}) \times (I_{CQ} + \Delta I_C)$$

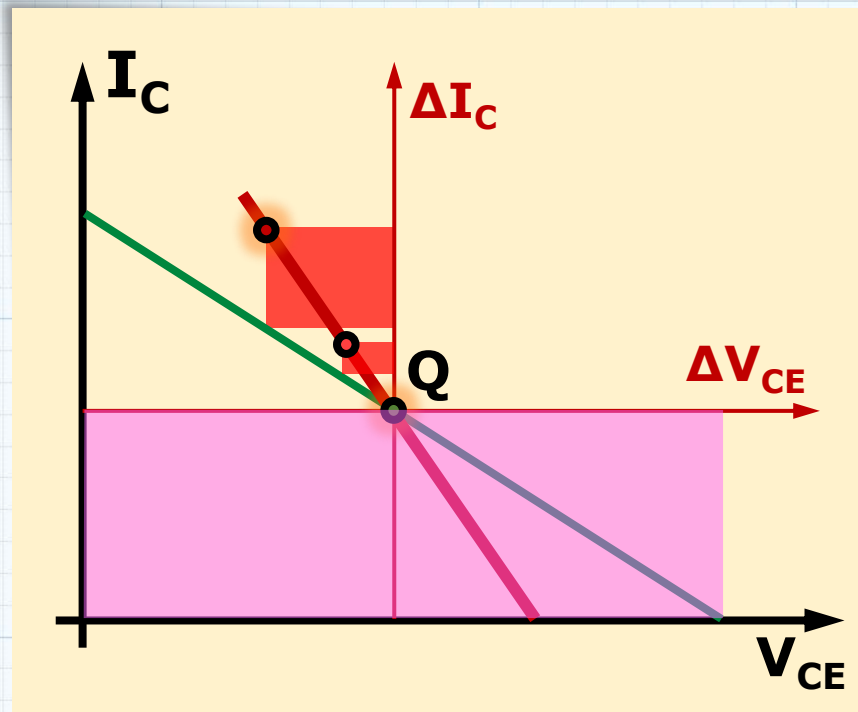
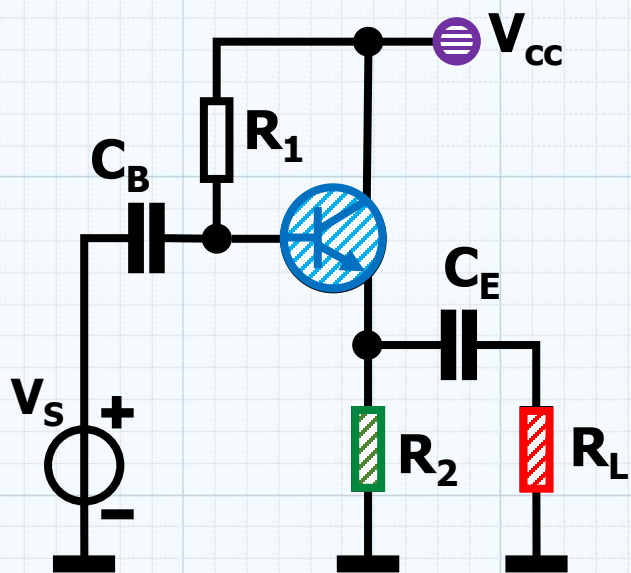
$$R_2 = V_{R2} \times I_{R2} = (V_{R2Q} + \Delta V_{R2}) \times (I_{R2Q} + \Delta I_{R2})$$

$$R_L = V_{RL} \times I_{RL} = (0 + \Delta V_{RL}) \times (0 + \Delta I_{RL})$$

$C_E$

$V_{CEQ} \Delta I_{CE}$

# 效率：图示



❓ 哪种信号  $\eta$  最好？

方波？三角波？正弦波？

❓  $\eta$  与信号频率？

非直接关联

❓ 如何改进  $\eta$ ？

降低偏置？但 ...

## 小 结 论

- ①  $P_{VCC} = V_{CC} \times (I_{CQ} + \Delta I_C) \xrightarrow{\text{对称扰动}} \overline{P_{VCC}} = V_{CC} \times I_{CQ}$  恒定
- ② 负载功耗：信号幅度越大， $P_{RL}$  越大  $\rightarrow \overline{P_{RL}}$  越大
- ③ 效率  $\eta = \overline{P_{RL}} / \overline{P_{VCC}}$  与信号幅度有关，也与波形有关

# 频率响应：定义

☑ 不同频率信号增益不同

☑ 绘制  $f \sim A(f)$  的曲线

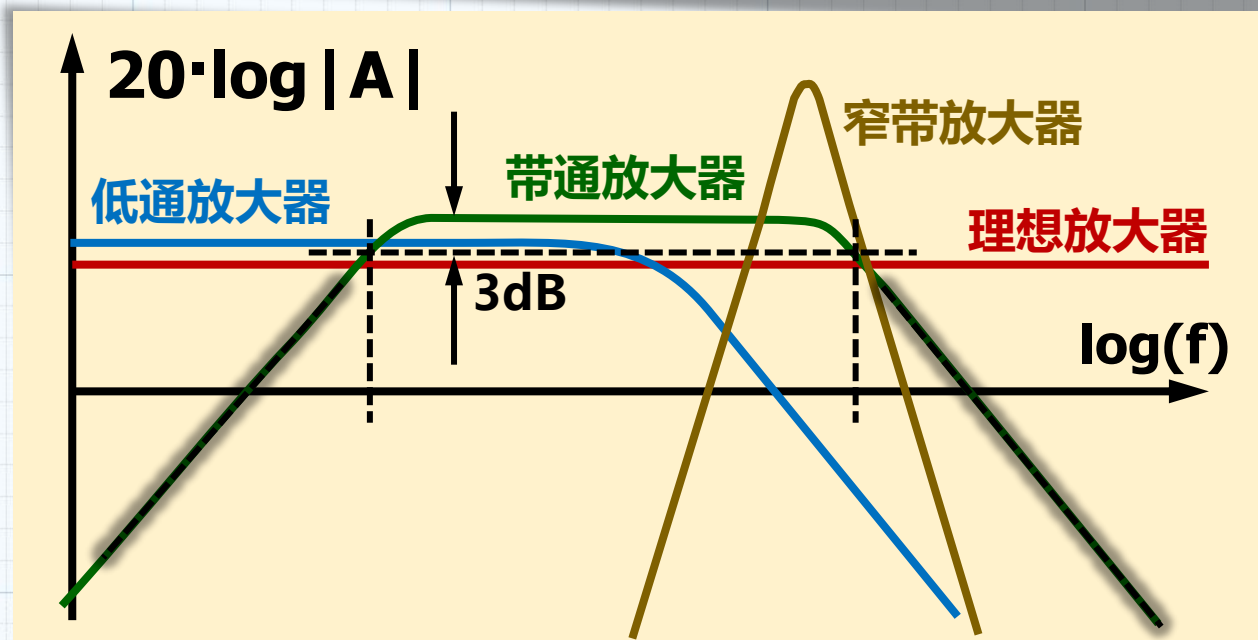
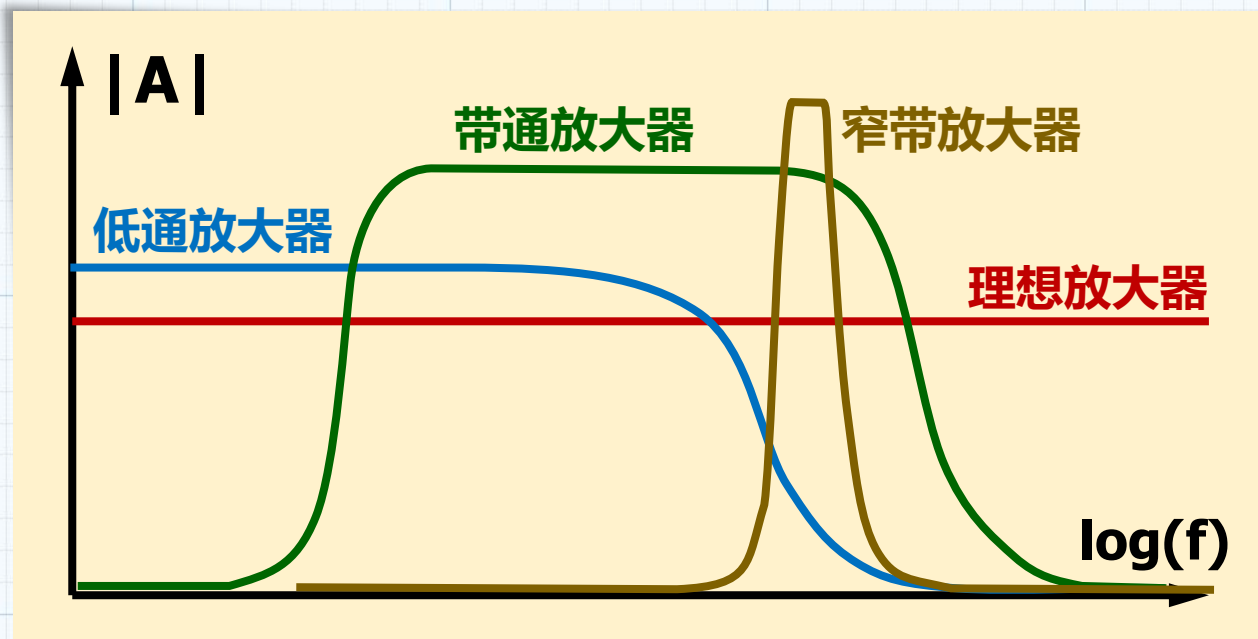
- ▶ 一般横轴取对数  $\log(f)$
- ▶ 纵轴可取  $20 \cdot \log_{10}|A(f)|$
- ▶ 后者以 dB 为单位

☑ 主要指标

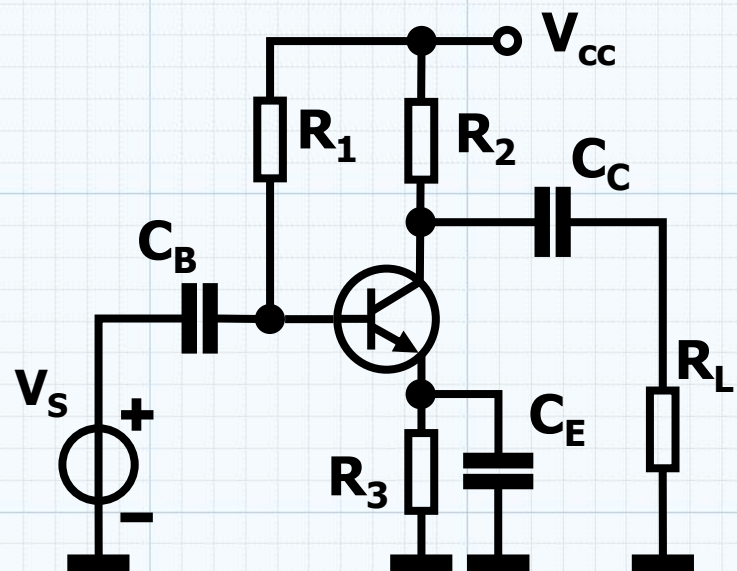
- ▶ 截止频率： $f_L$ ,  $f_H$ , 3dB带宽
- ▶ 滚降速度 | 滚降阶次
- ▶ 相频特性
- ▶ 带内波纹 | 平坦度
- ▶ 极点分布 (?) 稳定性 (?)

❓ 线性失真出现的条件?

多个频率分量 + 落入不同区域



# 频响: $f \rightarrow 0$ 和 $f \rightarrow \infty$



**?**  $f \rightarrow 0$  时, 能放大么?

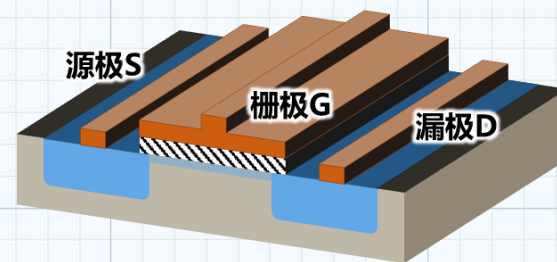
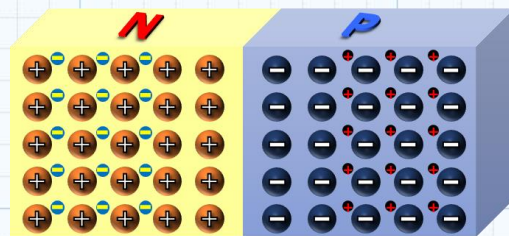
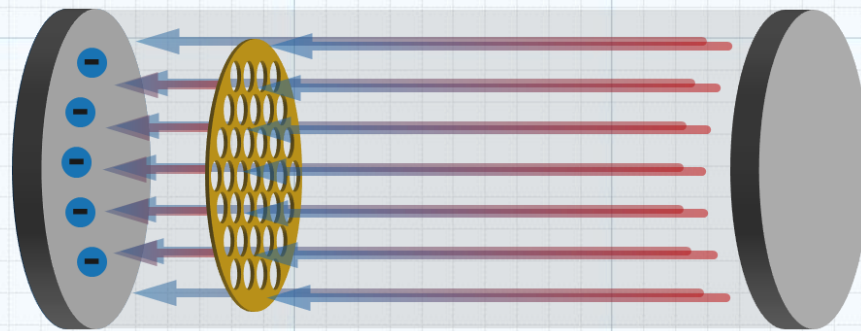
不能

$Z_{CB}, Z_{CC} \rightarrow \infty$ , 信号断路

→ 交流耦合的肯定都不能

$Z_{CE} \rightarrow \infty$ , 增益大幅减小

→ 直流耦合的要看情况



**?**  $f \rightarrow \infty$  时, 能放大么?

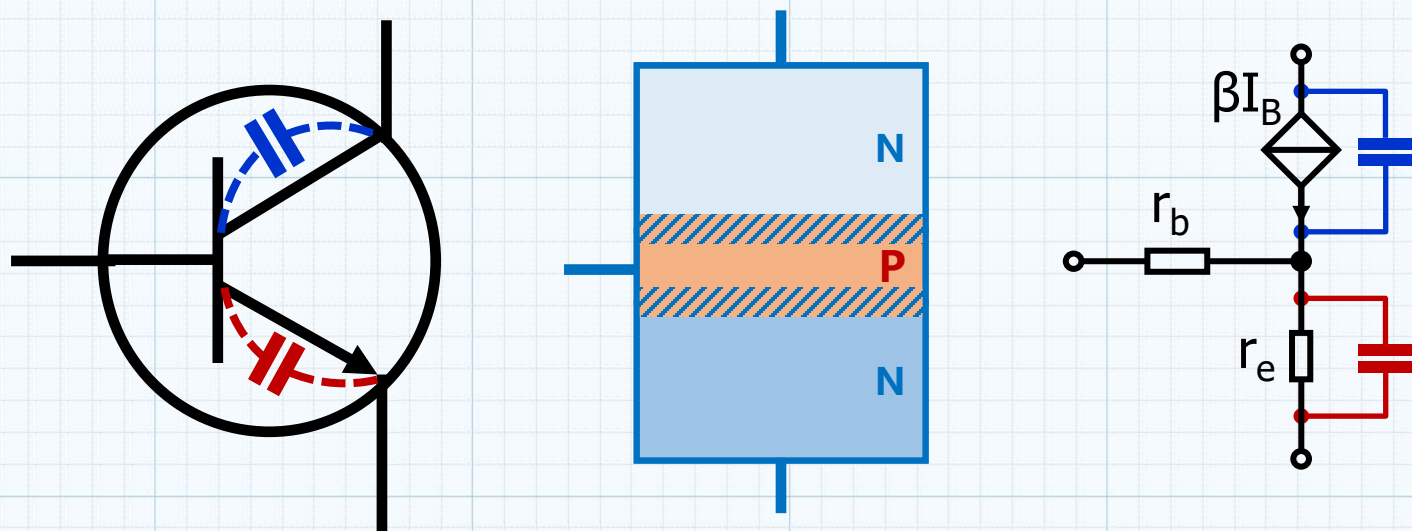
不能 不存在高通放大器

器件响应不可能无限快

- ▶ 载流子具有惯性
- ▶ 输运等过程需要时间
- ▶ PN结, MOS等结构存在电容效应



# 频响：BJT 高频模型

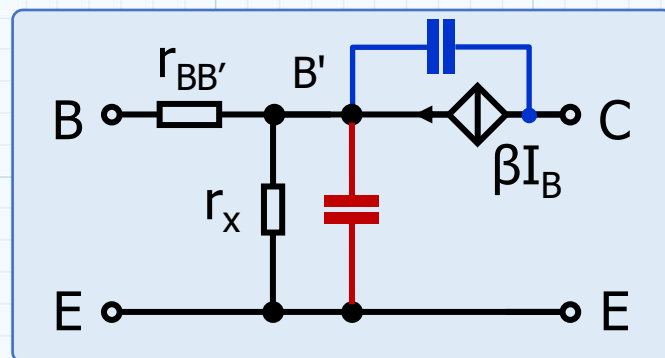
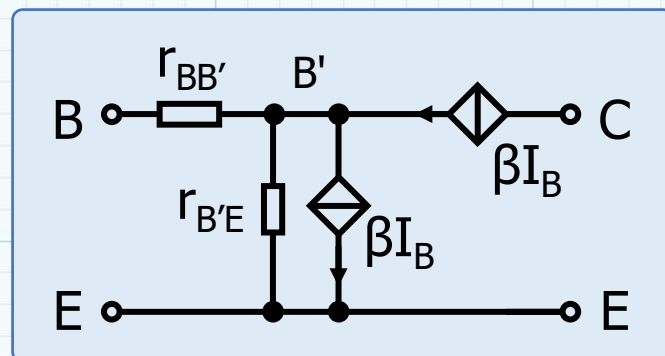
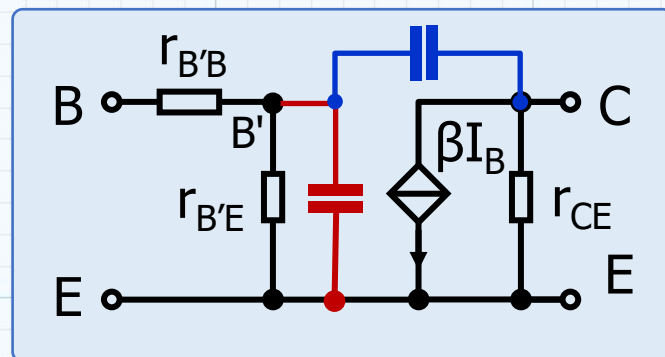


## ☑ 混合 $\pi$ 形模型 vs T 形模型

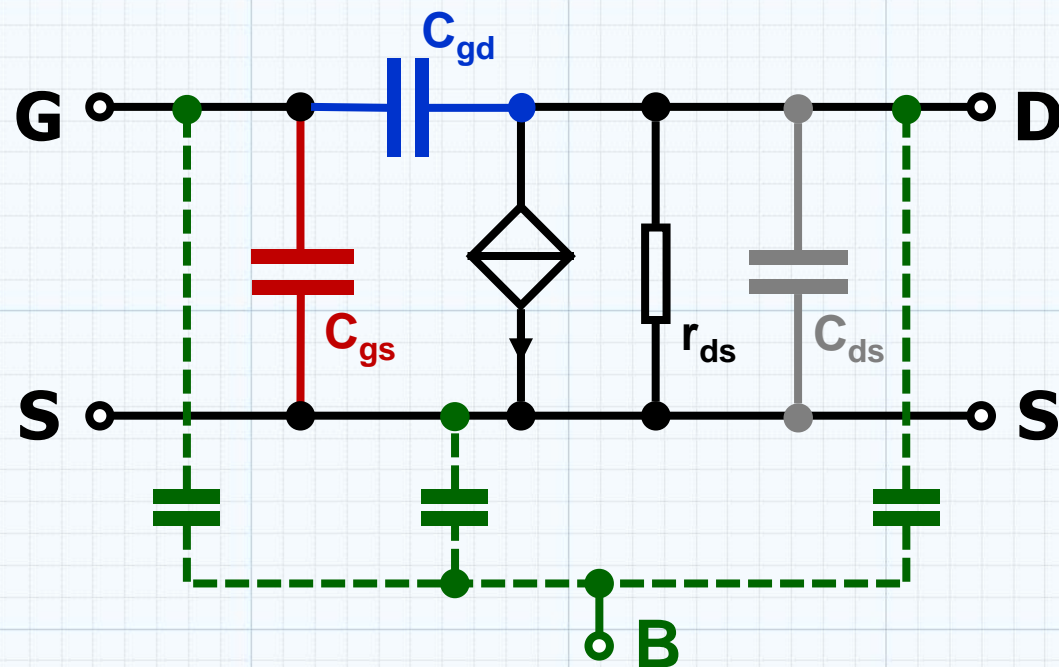
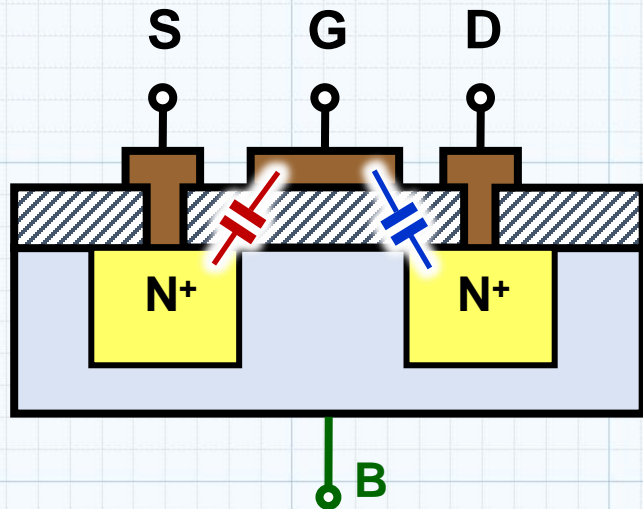
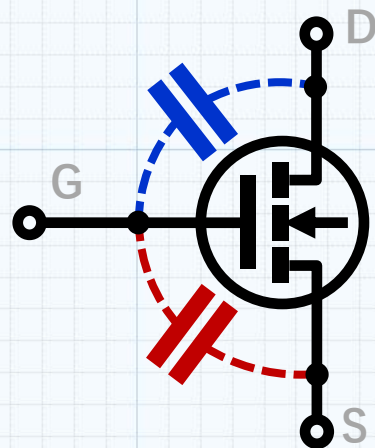
- ▶ 在  $r_{CE}$  较大的假设条件下
- ▶ 等效变换： $r_e = r_x = r_{B'E} / (1 + \beta)$

## ☑ 高频模型：引入PN结电容 $C_{B'E}$ 和 $C_{B'C}$

- ▶ 均为 10pF 数量级
- ▶  $C_{B'E}$  略大一些：E 区重掺杂



# 频响：FET 高频模型



## ✓ 高频模型：引入极间电容

▶ 在低频仍然适用，但电容几可忽略

## ✓ 参数：

▶ 典型数量级：

$g_m$

~0.01

$r_{ds}$

~100K

$C_{gs}$

~10pF

$C_{gd}$

~10pF

$C_{ds}$

~1pF

## ✓ 绝缘栅型FET：还存在背栅极与各极之间的电容

# 频响：分析方法

## ☑ 基本方法：将复阻抗代入，求解即可。

- ▶ 先计算  $|A|_{\max}$
- ▶ 令  $|A(f)| = |A|_{\max} / \sqrt{2} \rightarrow f_L, f_H \rightarrow \text{BW}$
- ▶ 若动态元件多  $\rightarrow$  系统阶数高  $\rightarrow$  求解复杂 + 结果琐碎

OVER

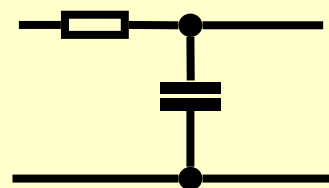
GAME  
OVER

## ☑ 复习：一阶 RC 滤波器

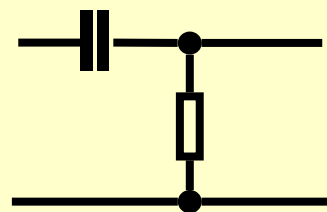
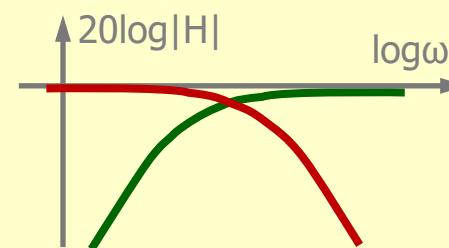
- ▶ 截止频率均为  $\omega_0 = 1/RC$
- ▶ 或：  $f_0 = 1/2\pi RC$
- ▶ 定义时间常数  $\tau = 1/RC$
- ▶  $\omega_0 = 1/\tau$

❓ 对于放大器呢？

情况会复杂很多



$$H_{LP}(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$



$$H_{HP}(\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

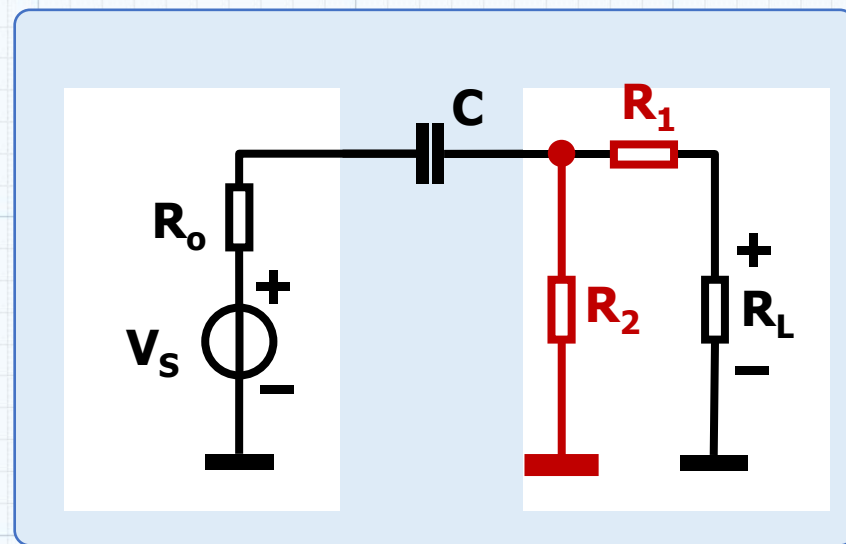
# 频响：讨论 (1)

## ☑ 情形1：耦合电容

▶ 前级等效：戴文宁； 后级等效：负载

$$A(\omega) = \frac{j\omega R_L C}{1 + j\omega(R_o + R_L)C} \cdot \frac{R_o + R_L}{R_o + R_L}$$

▶  $\omega_L = 1/(R_o + R_L)C$      $\tau = (R_o + R_L)C$



## ☑ 情形2：负载有串联

$$A(\omega) = \frac{j\omega R_L C}{1 + j\omega(R_o + R_1 + R_L)C}$$

▶  $\omega_L = 1/(R_o + R_1 + R_L)C$

$$\tau = (R_o + R_1 + R_L)C$$

## ☑ 情形3：负载有并联

$$A(\omega) = \frac{j\omega R_{\text{并}} C}{1 + j\omega(R_o + R_{\text{并}})C}$$

▶  $\omega_L = 1/(R_o + R_{\text{并}})C$

$$\tau = (R_o + R_{\text{并}})C$$



# 频响：讨论 (2)

## ✓ 情形4：旁路电容

▶ 前级等效：戴文宁； 后级等效：负载

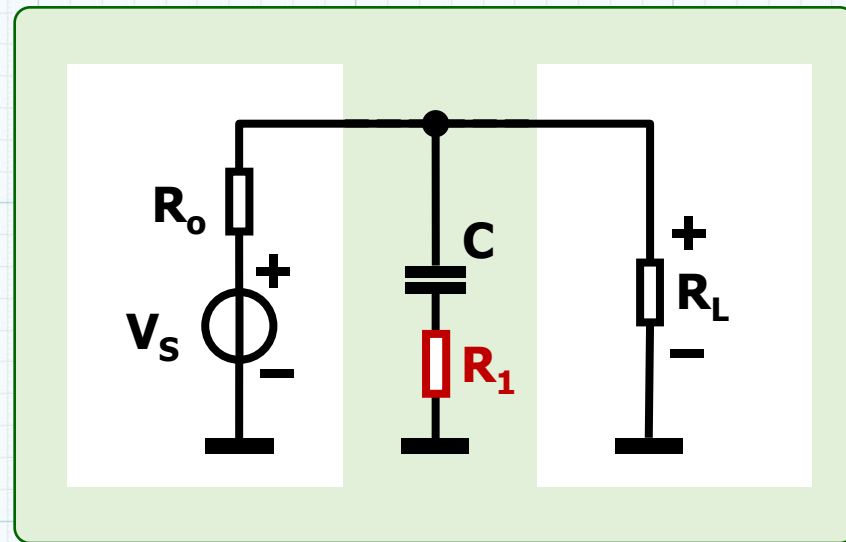
$$A(\omega) = \frac{R_L}{R_L + (1 + j\omega RLC)R_o} \cdot \frac{R_L + R_o}{R_L + R_o}$$

$$= \frac{1}{1 + j\omega(R_L || R_o)C} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

▶  $\omega_H = 1/(R_o || R_L)C$      $\tau = (R_o || R_L)C$

## ✓ 情形5：负载串接 或 并联电阻

- ▶ 有相仿结论 ...
- ▶ 均可计算时间常数后快速估计



## ✓ 情形6：C 串接电阻

$$\frac{R_L + j\omega C R_1 R_L}{R_L + R_o + j\omega C (R_1 R_L + R_o R_L + R_o R_1)}$$

????

规律呢？

高阶的咋办呢？

# 频响：宽带放大器通式

$$A(\mathbf{f}) = \frac{\mathbf{a}_m \mathbf{f}^m + \mathbf{a}_{m-1} \mathbf{f}^{m-1} + \dots + \mathbf{a}_0}{\mathbf{b}_n \mathbf{f}^n + \mathbf{b}_{n-1} \mathbf{f}^{n-1} + \dots + \mathbf{b}_0}$$

多数放大器频响形如：

$$A(\mathbf{f}) = \frac{250 \cdot \mathbf{j}\mathbf{f}}{(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / 10)(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / 10^5)}$$

$$A(\mathbf{f}) = \frac{-50 \cdot \mathbf{f}^2}{(1 + \mathbf{j}\mathbf{f})(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / 100)(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / 10^6)}$$

$$A(\mathbf{f}) = \frac{20 \cdot \mathbf{j}\mathbf{f}}{(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / 10)(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / 10^4)^2}$$

$$A(\mathbf{f}) = \frac{\mathbf{a}_m (\mathbf{j}\mathbf{f})^m}{(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / \mathbf{f}_{p1})(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / \mathbf{f}_{p2}) \dots (1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / \mathbf{f}_{pn})}$$

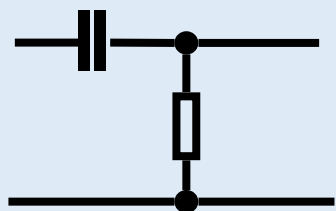
## ? 基本特征？

- ☑ 分母均为  $(1 + \mathbf{j}\mathbf{f} / \mathbf{f}_p)$  连乘积
- ☑ 分子均为  $\mathbf{j}\mathbf{f}$  幂
- ☑ 已分解因式 ← 高阶手动困难

## ? 有何用途？

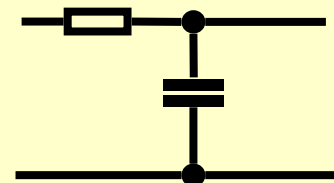
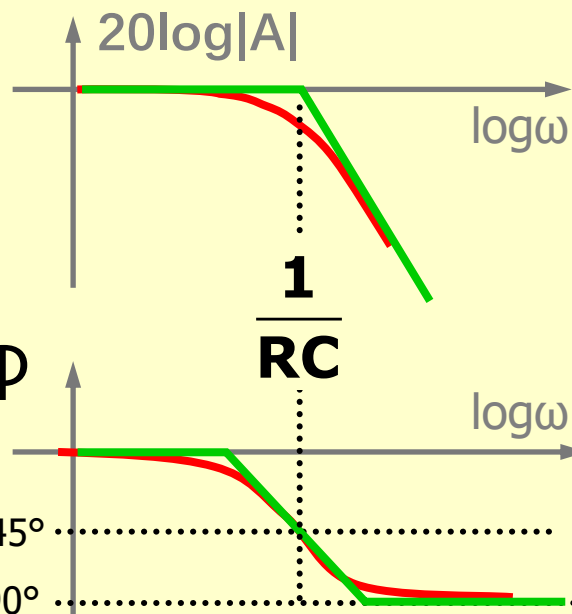
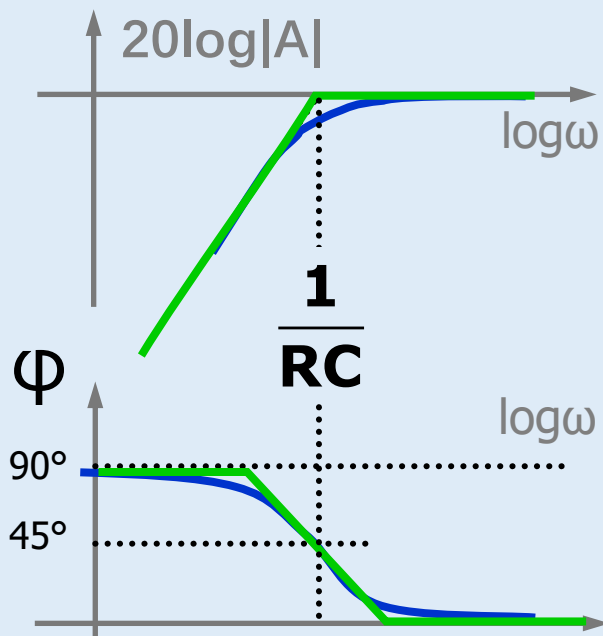
- ☑ 快速勾勒频响曲线草图
- ☑ 理解极点的意义
- ☑ 理解主极点的价值 (?)
- ☑ 估算高阶放大器截止频率 (?)

# 频响：一阶频响的特征



一阶高通

$$\frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$



一阶低通

$$\frac{1}{1 + j\omega RC}$$

- ✓ 幅频近似：双折线=水平段+滚降段（20dB/10倍频程） /dec
- ✓ 相频近似：三折线=两水平段 + 过渡段（45度/10倍频程）
- ✓ 规律：

$\omega_0 = 1/RC$

幅度降 3dB，相移45度

相频曲线均单调减

通带深处均归一

# 频响：宽带放大器拆分

$$A(f) = \frac{a_m(jf)^m}{(1+jf/f_{p1})(1+jf/f_{p2})\dots(1+jf/f_{pn})}$$

$$A(f) = A_M \cdot \frac{jf/f_{L1}}{1+jf/f_{L1}} \cdot \frac{jf/f_{L2}}{1+jf/f_{L2}} \cdots \frac{1}{1+jf/f_{H1}} \cdot \frac{1}{1+jf/f_{H2}} \cdots$$

一阶高通

$$\frac{j\omega RC}{1+j\omega RC}$$

$$\frac{jf/f_L}{1+jf/f_L}$$

m项

n-m项

$$\frac{1}{1+jf/f_H}$$

一阶低通

$$\frac{1}{1+j\omega RC}$$

✓ 频响拆分为：一阶低通网络和高通网络的乘积

- ▶ 每一阶高通网络：分子1项，分母1项
- ▶ 每一阶低通网络：分母1项
- ▶ 剩下的常数  $A_M$ ：

→  $f_L$

→  $f_H$

→ 中频复数增益

❓ 哪些  $f_p$  选为  $f_L$ ？哪些选为  $f_H$ ？

$f_L$  较小； $f_H$  较大



# 频响：波特图草图

$$A(f) = \frac{a_m(jf)^m}{(1+jf/f_{p1})(1+jf/f_{p2})\dots(1+jf/f_{pn})}$$

$$A(f) = A_M \cdot \frac{jf/f_{L1}}{1+jf/f_{L1}} \cdot \frac{jf/f_{L2}}{1+jf/f_{L2}} \dots \cdot \frac{1}{1+jf/f_{H1}} \cdot \frac{1}{1+jf/f_{H2}} \dots$$

## ☑ 极点排序

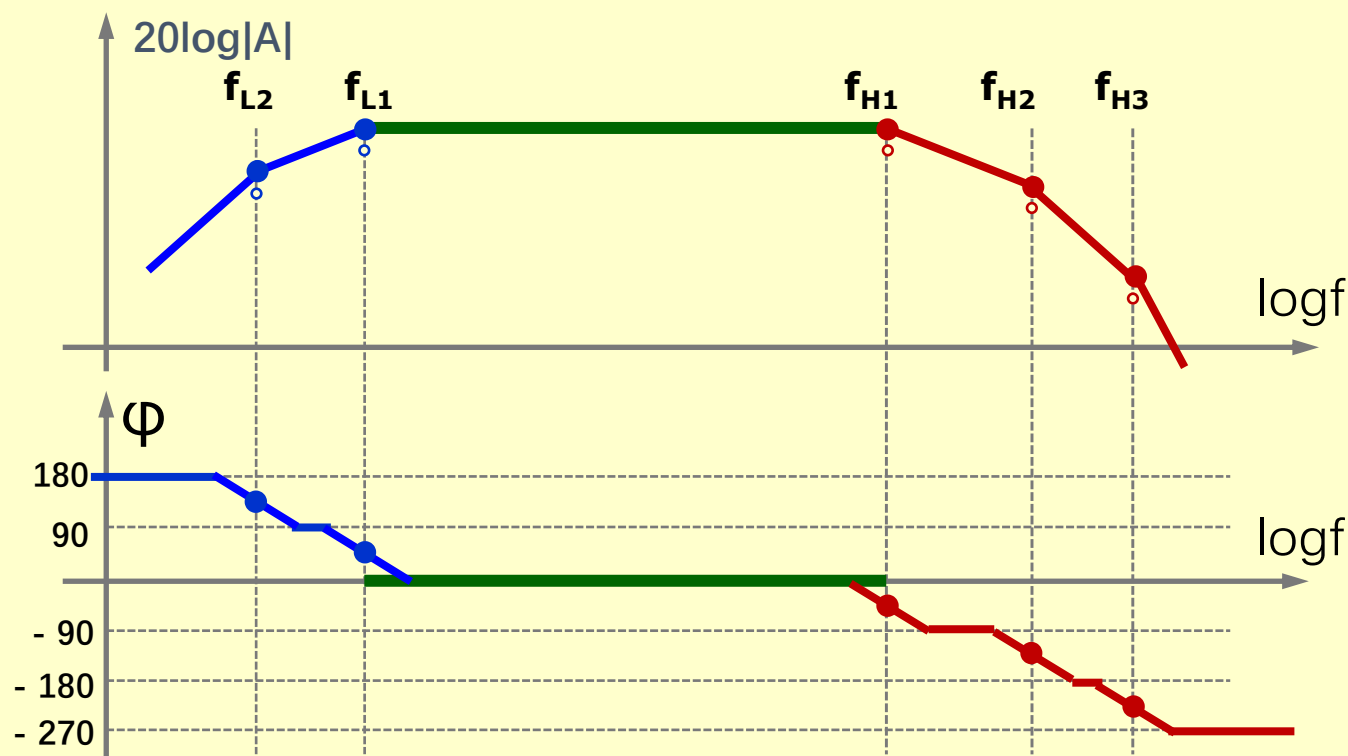
## ☑ 绘制 $A_M$ ：增益、相移

## ☑ 高频延伸：逐 $f_H$ 引入

- ▶ 滚降递加 20dB/dec
- ▶ 相移递加 90度
- ▶ 极点处相移 45度
- ▶ 相移斜率 45度/dec
- ▶ 极点处亏损 3dB

## ☑ 低频延伸：逐 $f_L$ 引入

- ▶ 如法炮制 ...



# 频响：绘制波特图草图

1. 将极点按升序排列，并标线

2. 高通：

高通

$$\frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L}$$

3. 低通：

低通

1

$$\frac{1}{1 + jf/f_H}$$

4. 配项归一化后，剩余常数为  $A_M$

5. 在幅频和相频图中绘制  $A_M$

6. 从中频向高频逐个绘制低通项

7. 从中频向低频逐个绘制高通项

❓ 若极点比较靠近，如何？ 忍

❓ 多重极点的情形，如何？

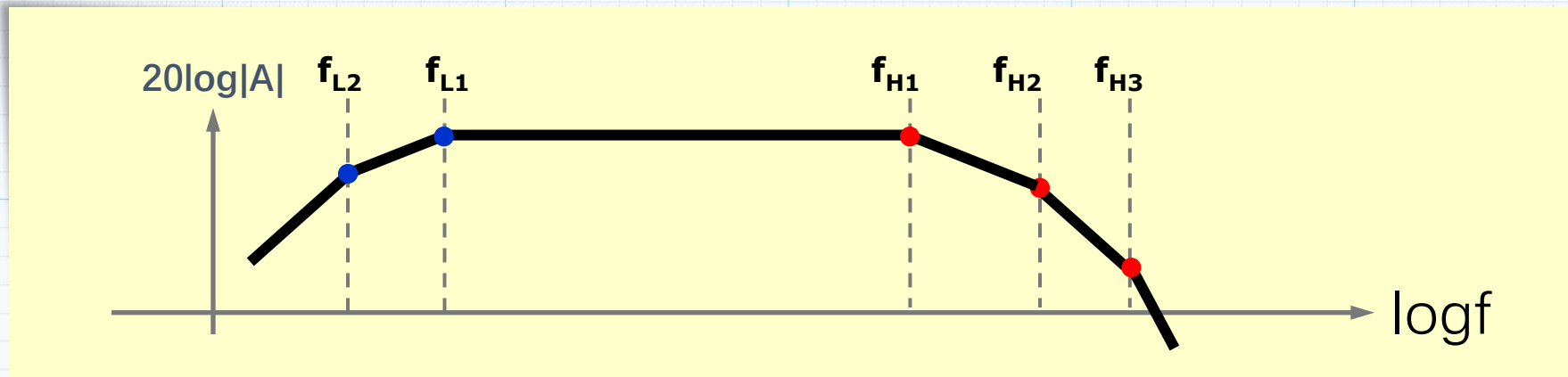
滚降加倍；相移加倍

$$A(f) = \frac{250 \cdot jf}{(1 + jf/10)(1 + jf/10^5)}$$

$$A(f) = \frac{-50 \cdot f^2}{(1 + jf)(1 + jf/100)(1 + jf/10^6)}$$

$$A(f) = \frac{20 \cdot jf}{(1 + jf/10)(1 + jf/10^4)^2}$$

# 频响：从绘制过程想开去...



❓ 工程中需要  $A(f) \rightarrow$  作图 么？

不会 ← 没人帮忙分解因式

❓ 工程中需要推导  $A(f)$  么？

大多仿真或估算，但考试中也许需要

❓ 估算的方法呢？

最糙+最快：带宽增益积(?) 以及 ...

❓  $A(f)$  中决定带宽的是谁？

$f_{L1}, f_{H1}$

主极点

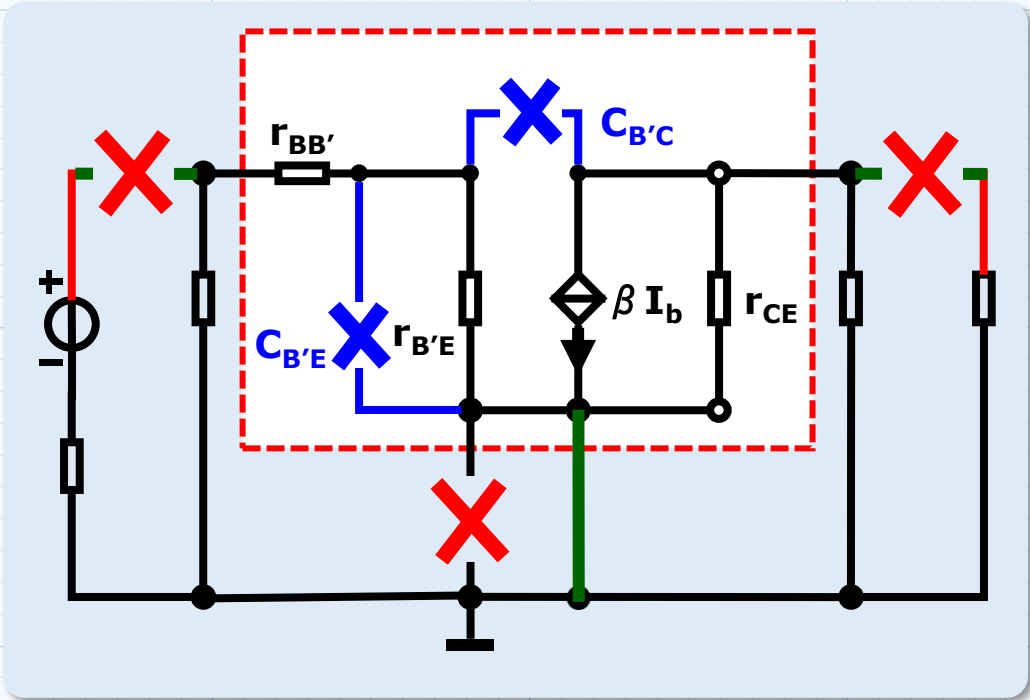
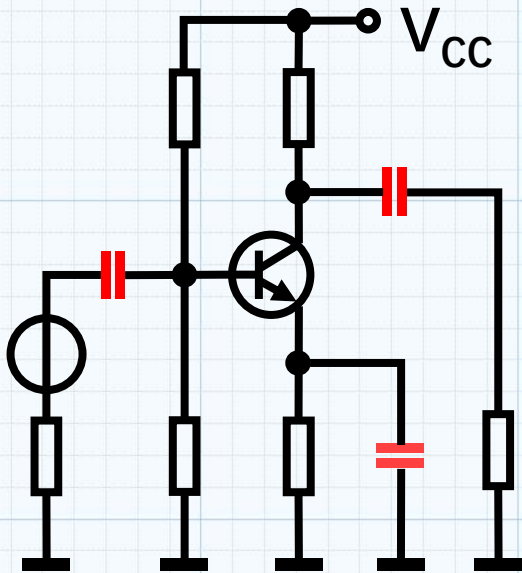
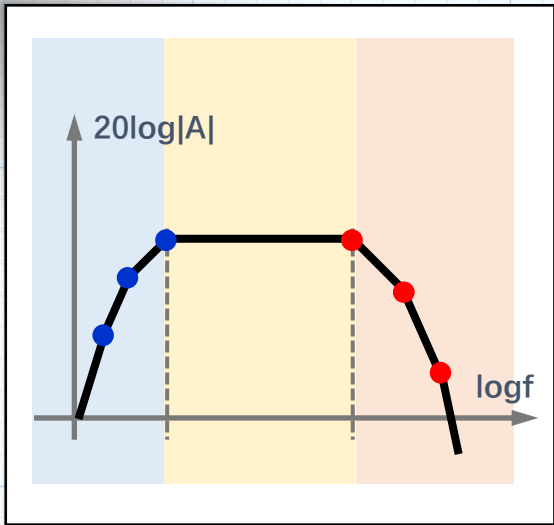
❓ 其它极点是否意义不大？

有意义 ← 涉及反馈稳定性等 (?)...

❓ 能否不推  $A(f)$  而估  $f_{L1}, f_{H1}$ ？

有相对简便+比较粗略的方法

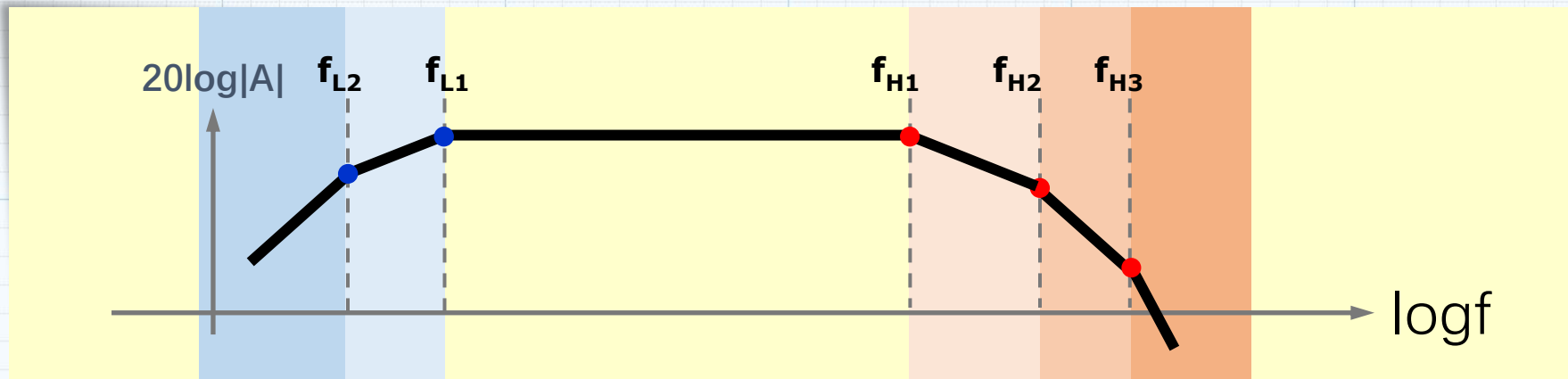
频响：低频、高频问题的分离



	直流源	交流源	电阻	晶体管	大电容	小电容	电感...
直流	☺	X	☺	非线性	断	断	...
低频	X	☺	☺	微扰	!	断	...
中频	X	☺	☺	微扰	短	断	...
高频	X	☺	☺	微扰	短	!	...



# 频响：估算主极点…



## ? 快速估算 $f_{L1}$ , $f_{H1}$ ?

$f_{L1}$  与高频小电容无关

$f_{H1}$  与大电容无关

降阶  
简化

分析时动态元件数  $\rightarrow$  求解问题阶数 ☹

## ? 中频增益总是正/负实数么 ?

原则上是的  $\leftarrow$  正常工程师的设计

所有动态元件  $\rightarrow$  中频近似 的沉睡

## ! 额外假设：极点间相距较远

$\rightarrow$  主极点：由“单个”动态元件造成

$\rightarrow$  主极点附近，“主犯”开始苏醒  
而其他动态元件仍沉睡

$\rightarrow$  往外走  $\rightarrow$  更多动态元件苏醒

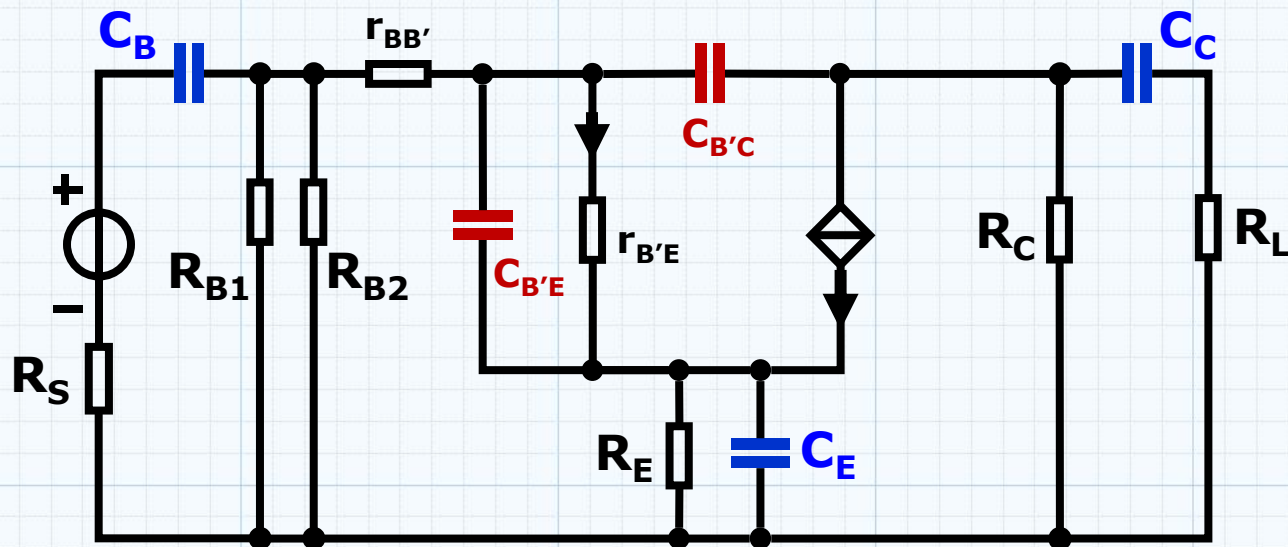
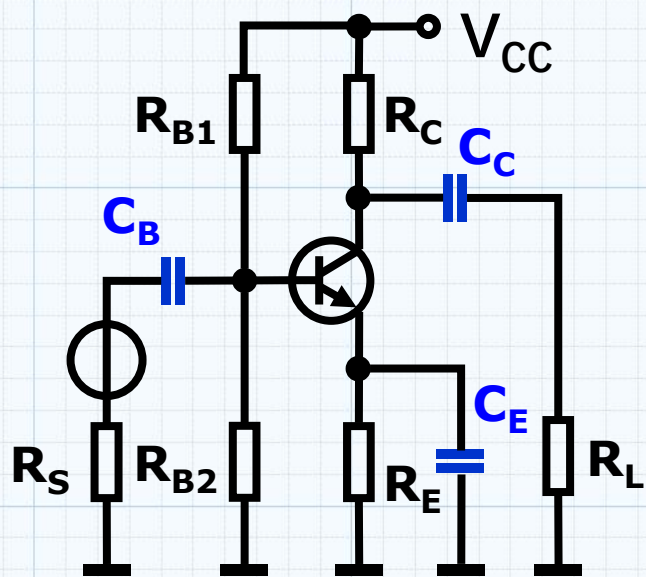
其它极点：多个动态元件联合作用形成

估算方法

逐个试探，看谁先睁眼

每次试探，均为一阶系统！

# 频响：估算 $f_L$ 示例



✓  $f_L$  的候选者：由  $C_B$ ,  $C_C$ ,  $C_E$  担当

①  $C_B$  外回路电阻  $R_S + R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel R_{i_{in}}$   $\rightarrow \tau_B \rightarrow f_{LB}$

②  $C_C$  外回路电阻  $R_L + R_C$   $\rightarrow \tau_C \rightarrow f_{LC}$

③  $C_E$  外回路电阻  $R_E \parallel [r_{EB} + (R_S \parallel R_{B1} \parallel R_{B2}) / (1 + \beta)]$   $\rightarrow \tau_E \rightarrow f_{LE}$

④ 取  $f_{LB}$ ,  $f_{LC}$ ,  $f_{LE}$  中最大者