



复旦大学微电子学系 唐长文

第3章 晶体管放大器



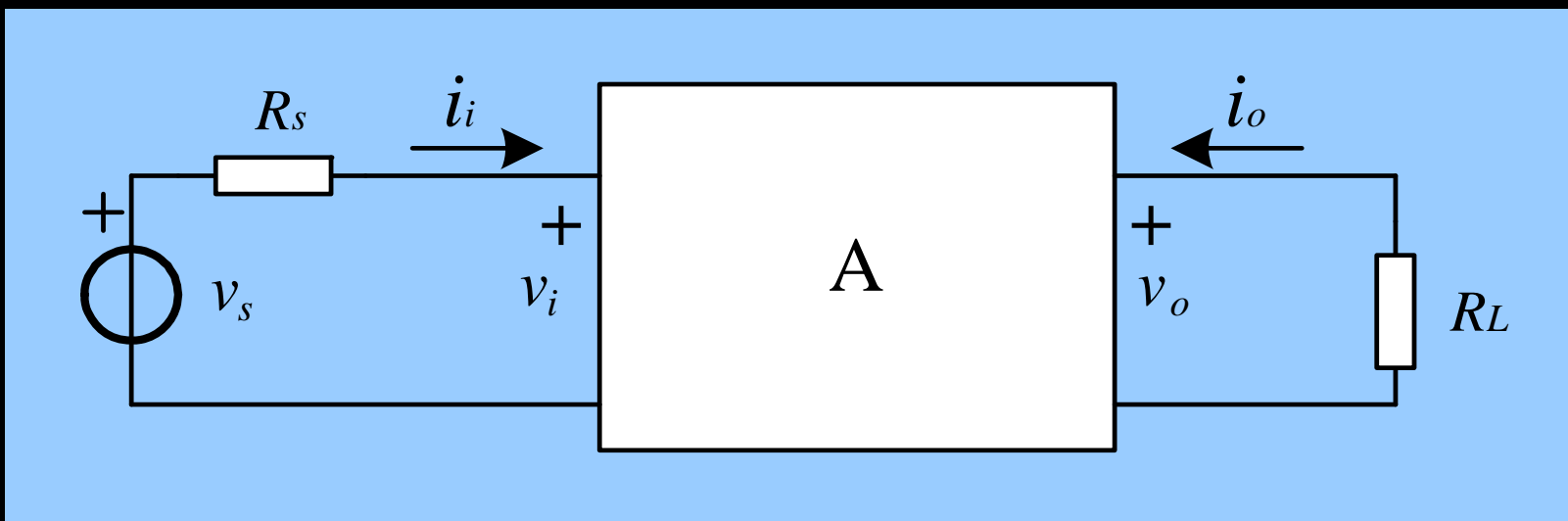


放大器概述

放大器的一般描述
分析放大器的一般方法

放大器的一般描述

- 用双口网络表示一个放大器



- 激励与响应是电压或电流



放大器的功能

- 放大信号中的有效信息成分，抑制其中的无效信息成分
 - 一般情况下，只有变动的信号才可能带有有效信息，所以放大器的放大对象就是信号中的变动部分
 - 由于信号的能量一般局限在某个频率范围内，所以放大器都有其有效的工作频段
 - 被放大信号的能量来自电源



放大器的性能指标

- 增益
 - 电压/电流增益
 - 功率增益
- 输入阻抗
- 输出阻抗
- 频率响应
- 非线性失真



放大器的增益

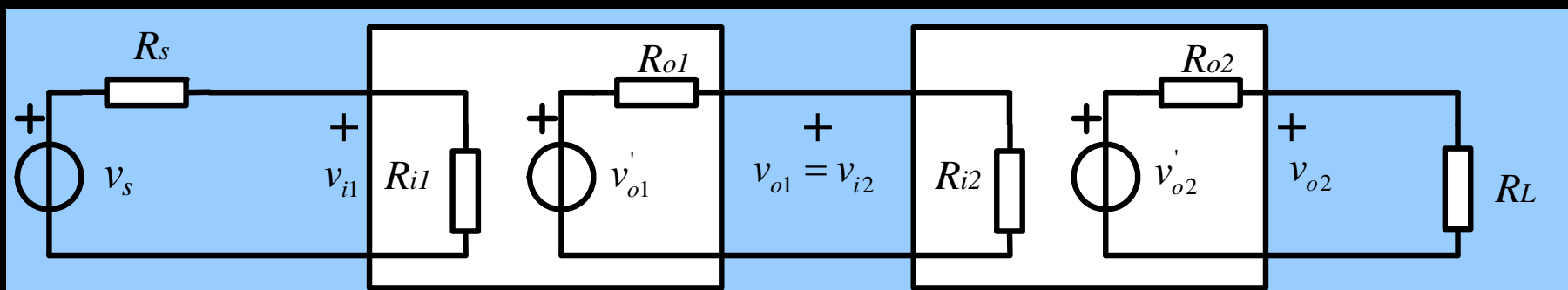
- 电压增益
 - 电流增益
 - 跨导增益
 - 跨阻增益
 - 常将电压（电流）增益的模取对数形式表示
- } 常用，一般是一个复数
- } 通常仅在分析的中间过程运用

$$A_v = 20 \lg \left| \frac{v_o}{v_i} \right| \text{ (dB)}$$



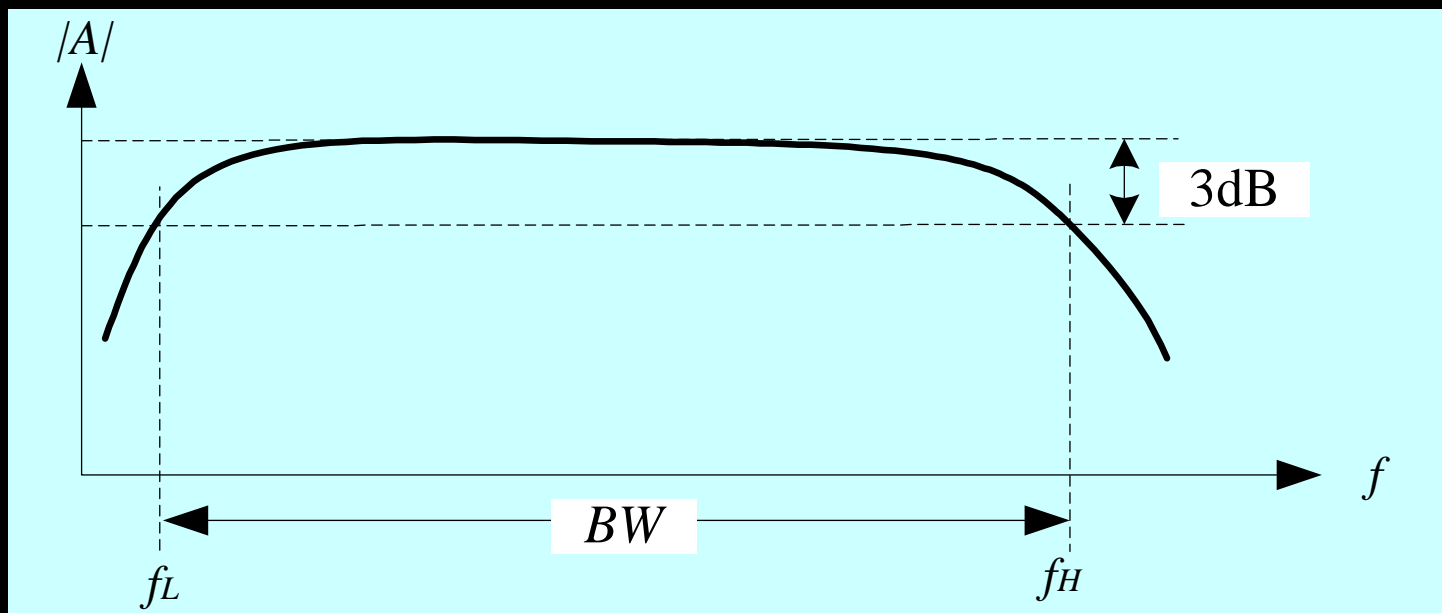
放大器的输入阻抗和输出阻抗

- 输入阻抗：输入电压与输入电流之比
- 输出阻抗：输出电压与输出电流之比
- 输入阻抗和输出阻抗均会直接或间接影响放大器



放大器的频率响应

- 定义电压（电流）增益下降3dB为截止频率



- 上下截止频率之间为放大器的通频带



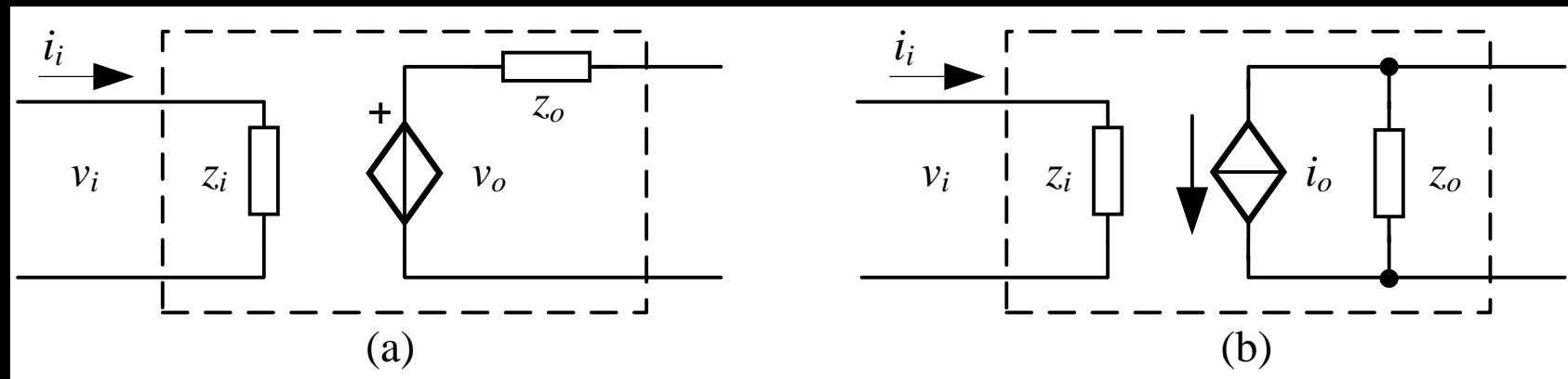
放大器的非线性失真

- 非线性失真一般指谐波失真
- 与频率失真有本质的区别
- 总谐波失真系数的定义

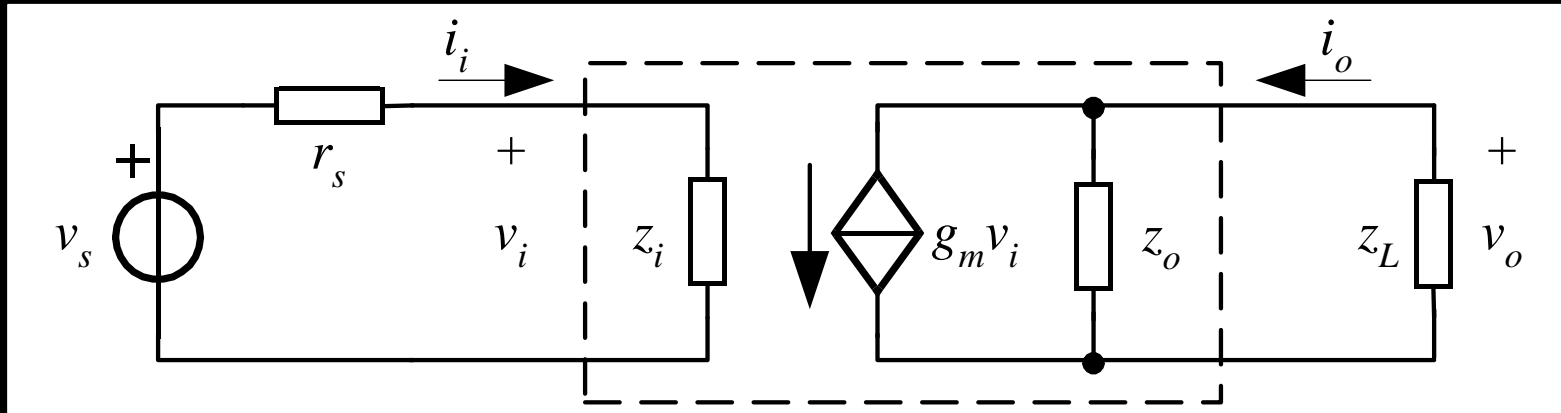
$$THD = \sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2}$$

线性放大器的一般形式

- 一般而言，线性放大电路可以用一个具有输入阻抗、输出阻抗和受控源的网络进行描述。
- 受控源可以是VCVS、CCCS、VCCS和CCVS四种形式中的任意一种



以VCCS构成的放大电路



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m v_i (z_o // z_L)}{v_i} = -g_m (z_o // z_L) = -g_m z_L'$$

$$z_L' = z_o // z_L$$

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} = \frac{g_m v_i \frac{z_o}{z_o + z_L}}{v_i / z_i} = g_m \frac{z_o}{z_o + z_L} z_i = g_m \frac{z_L'}{z_L} z_i$$

$$A_g = \frac{i_o}{v_i} = \frac{g_m v_i \frac{z_o}{z_o + z_L}}{v_i} = g_m \frac{z_o}{z_o + z_L} = g_m \frac{z_L'}{z_L}$$

$$A_r = \frac{v_o}{i_i} = -\frac{g_m v_i (z_o // z_L)}{v_i / z_i} = -g_m z_L' z_i$$



放大器的一般分析过程

1. 按照分析的目的画出等效电路
2. 根据等效电路列出电路方程
3. 求解方程，得到分析目标的结果（参数），求解过程中可能要作合理的简化
4. 根据需要，重复上述步骤1~3
5. 根据得到的所有结果，分析电路的性能



晶体管单管放大器

单管放大器的一般结构

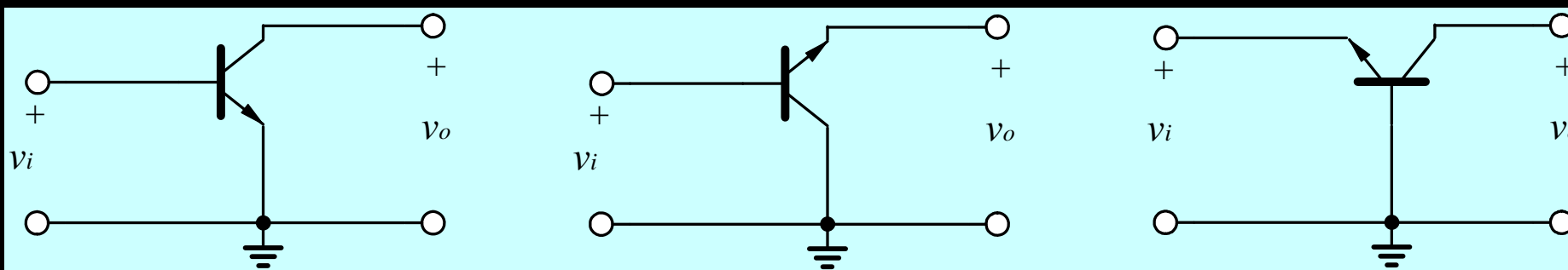
单管放大器的分析方法

单管放大器的频率特性

单管放大器的比较

双极型晶体管的单管放大器的类型

- BJT单管放大器
 - 共发射极放大器
 - 共集电极放大器
 - 共基极放大器



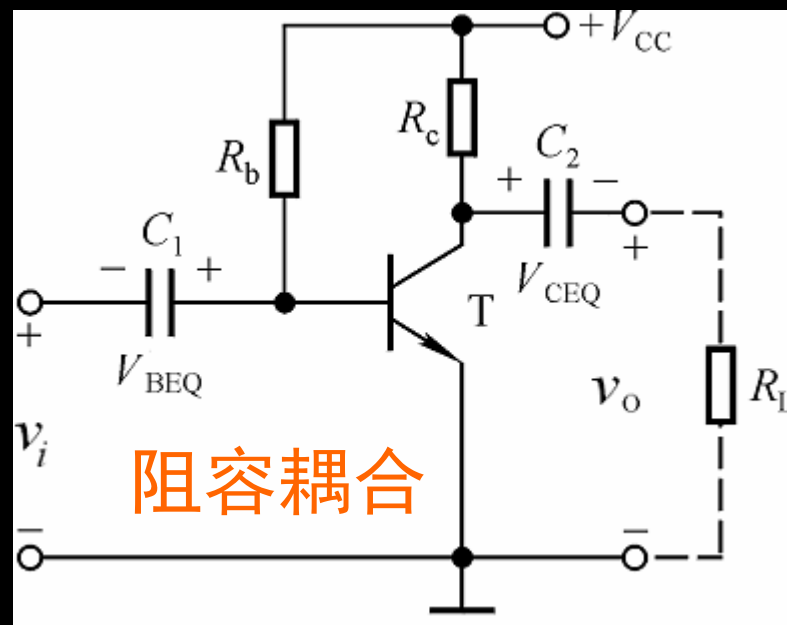
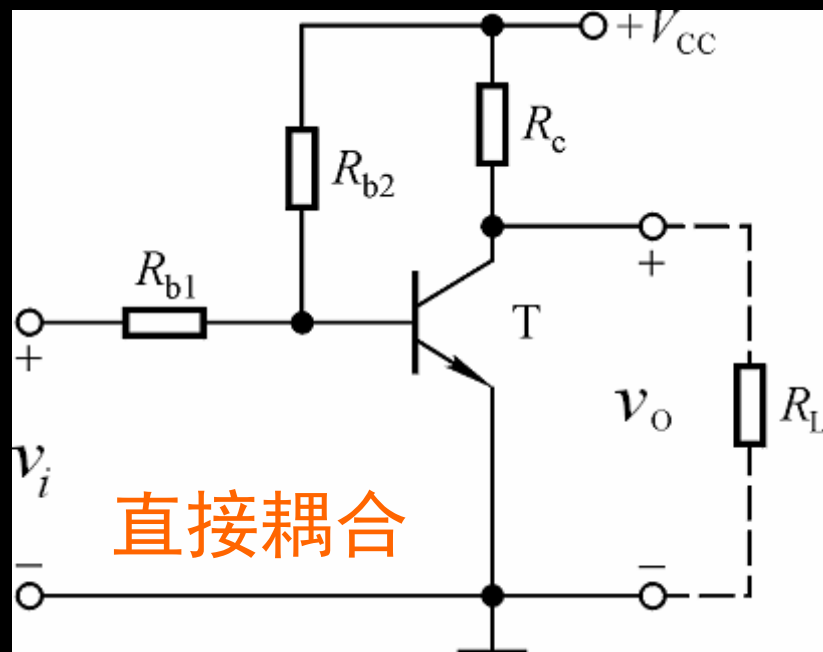
共发射极

共集电极

共基极

直接耦合与阻容耦合

- 直接耦合：信号源、负载直接与放大器相连
- 阻容耦合：信号源、负载通过电容与放大器相连
- 为什么要采用阻容耦合？

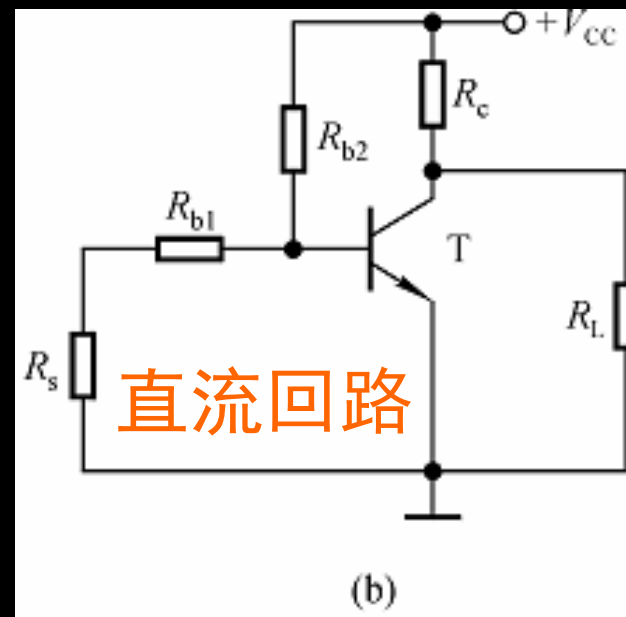
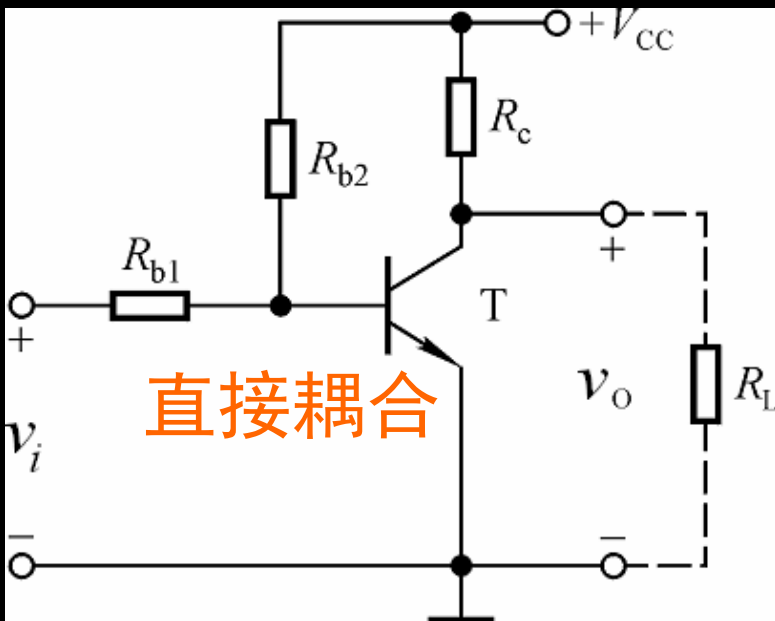




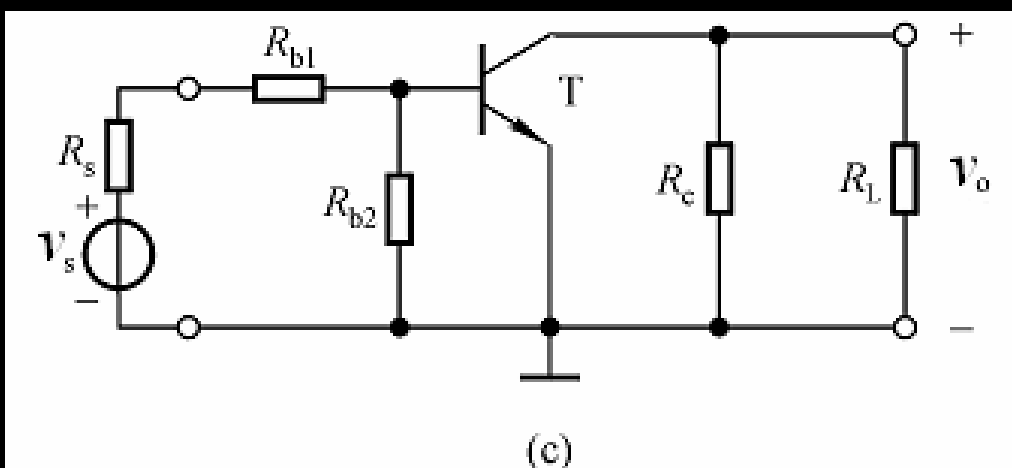
直流回路和交流回路

- 如何处理直流回路和交流回路?
- 直流回路：研究静态工作点
 - 电容视为开路
 - 电感视为短路
 - 信号源视为短路，但应保留其内阻
- 交流回路：研究交流小信号动态参数
 - 容量大的电容(耦合电容)视为短路
 - 无内阻的直流电源视为短路

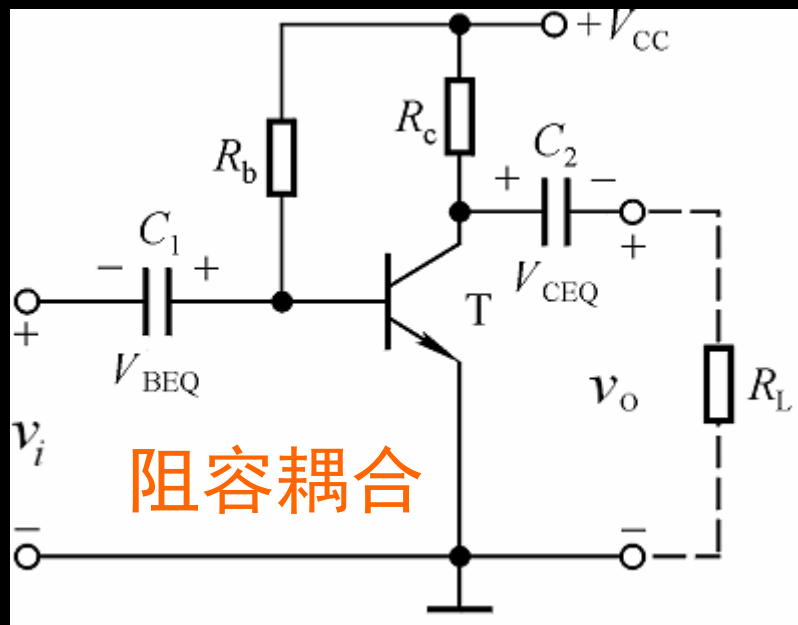
直接耦合的直流回路和交流回路



交流回路

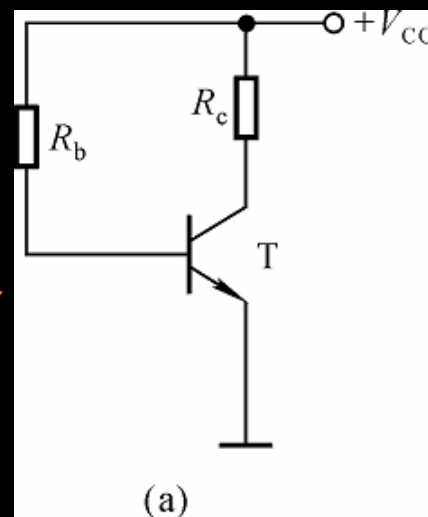


阻容耦合的直流回路和交流回路

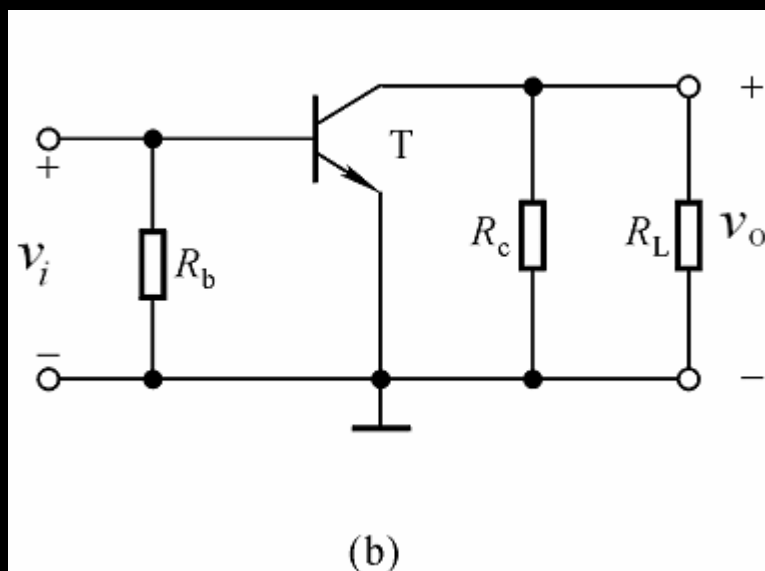


阻容耦合

直流回路



交流回路

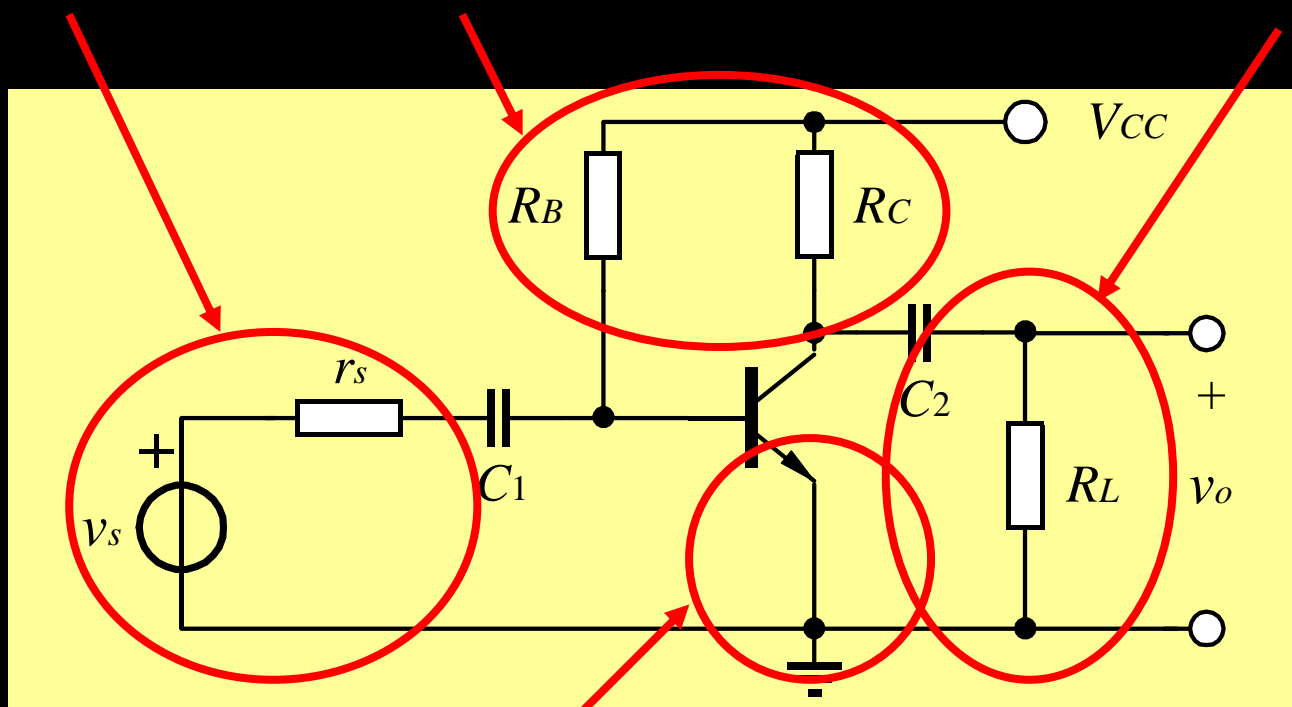


共射放大器的结构

信号源

直流偏置

负载

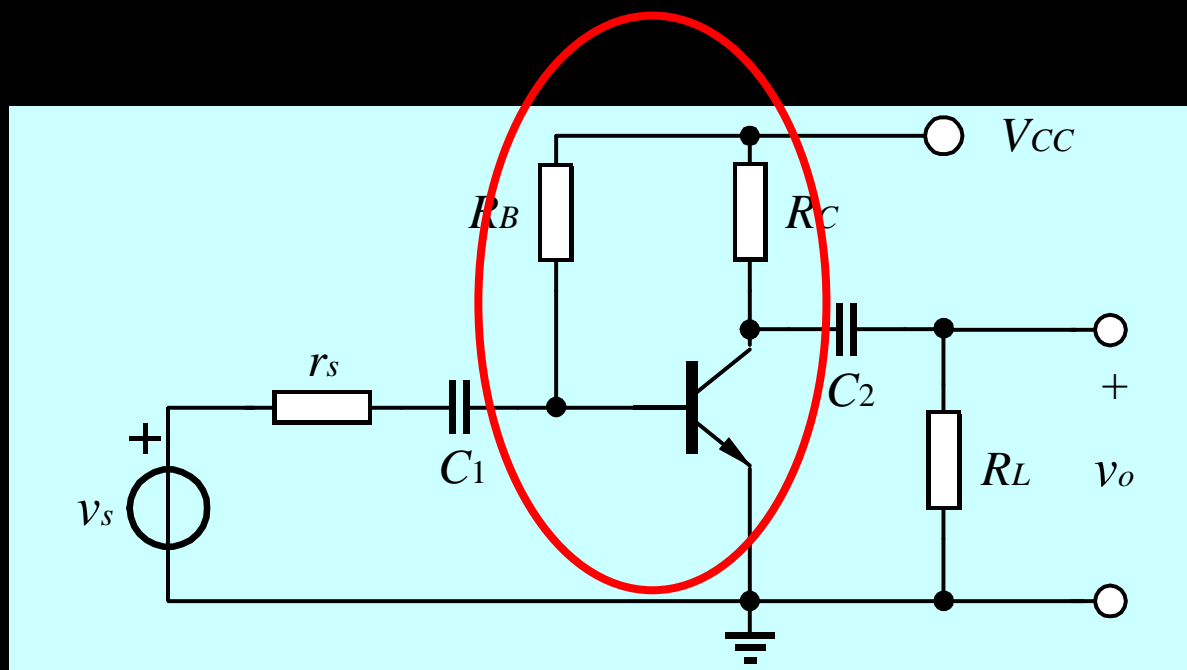


信号输入输出共用发射极

直流偏置

- 作用：提供晶体管合适的直流工作点
- 注意点：正确区分直流回路(电容开路，电感短路)

- 分析方法：
估算法
图解法



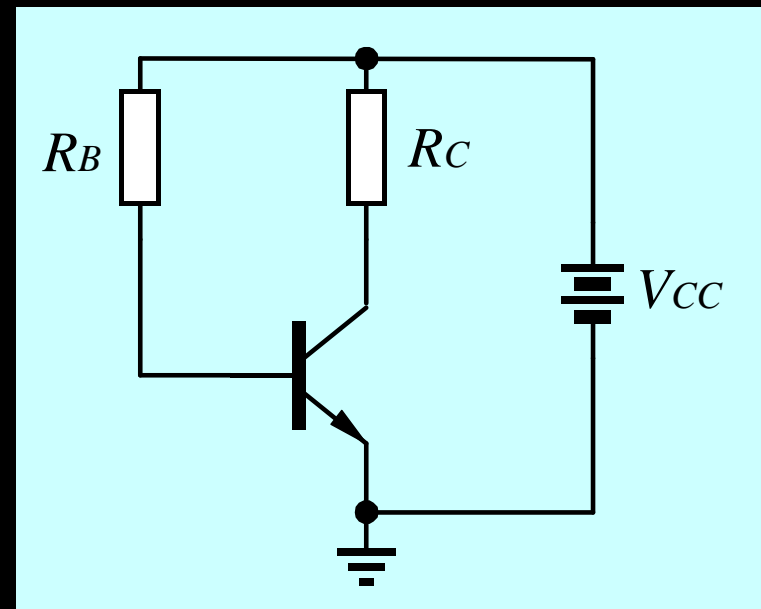
晶体管直流偏置的估算法分析

- 已经在第2章详细讲述
- 要点：用带阈值的二极管模型等效发射结，用CVCS等效集电结

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R_B}$$

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

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C$$



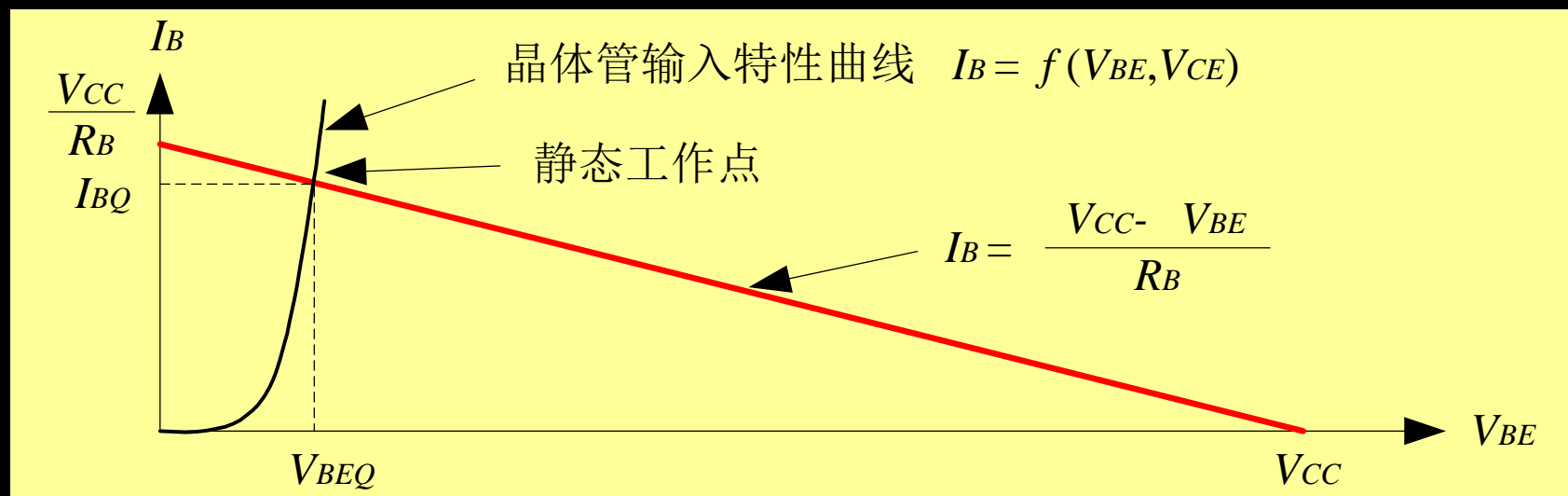
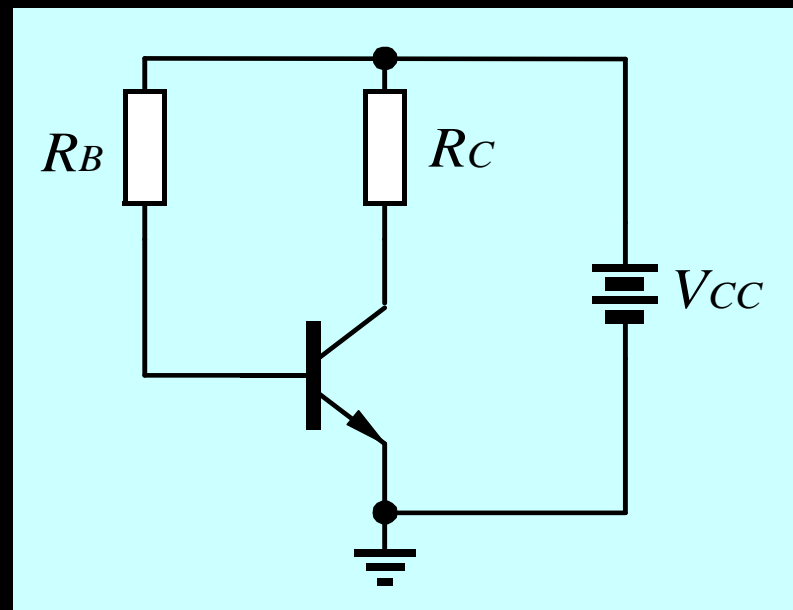


晶体管直流偏置的图解法分析

- 在晶体管输入回路中，联合晶体管输入特性曲线与输入部分的偏置电路特性曲线，其交点就是输入回路的偏置点（静态工作点）
- 在晶体管输出回路中，联合晶体管输出特性曲线与输出部分的偏置电路特性曲线，其交点就是输出回路的偏置点（静态工作点）

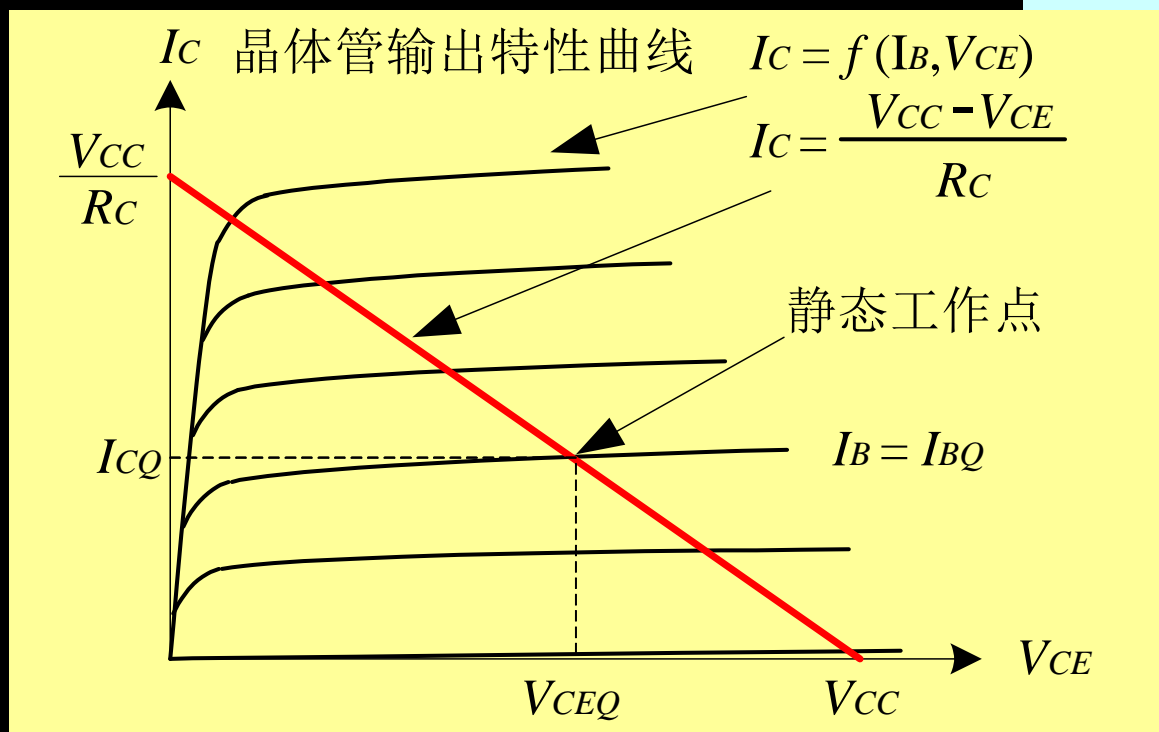
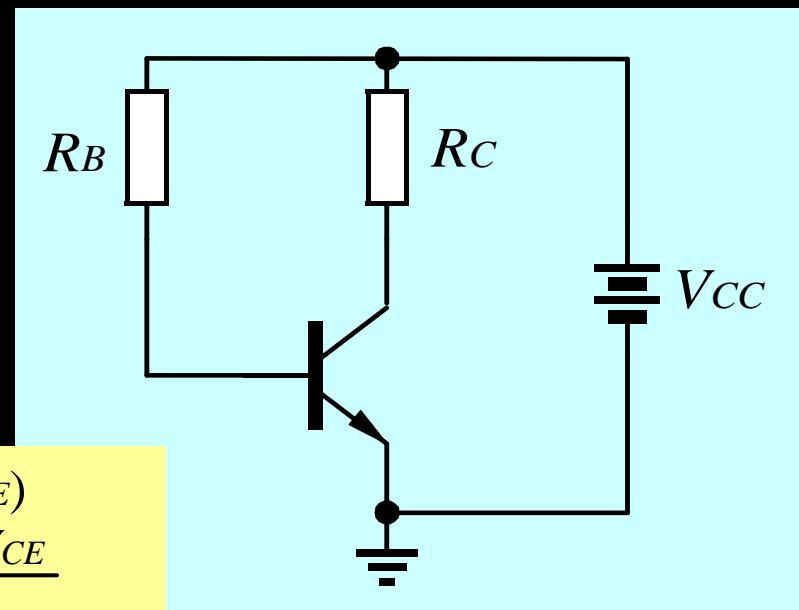


图解法：输入回路





图解法：输出回路



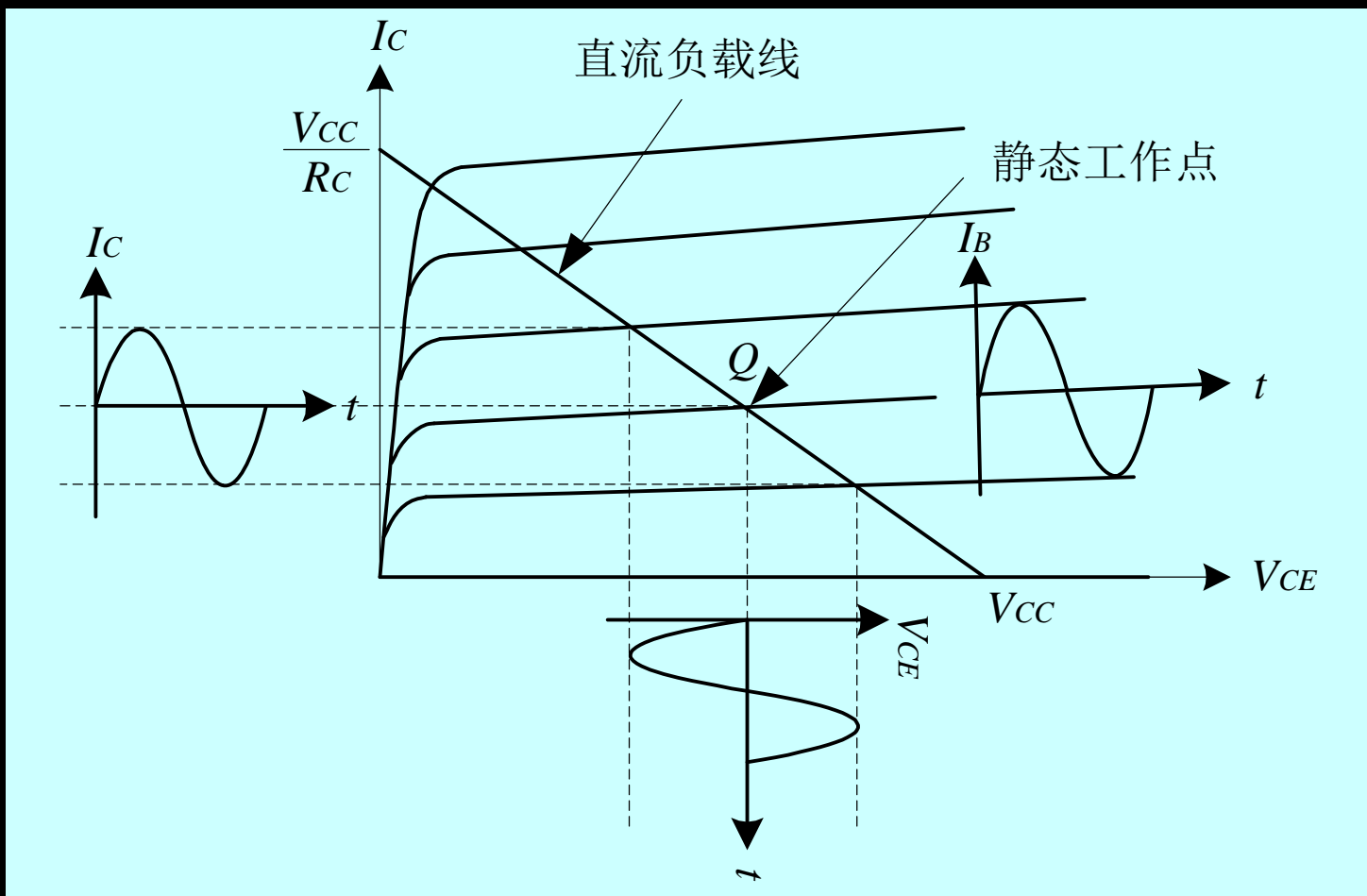


单管共射放大器的输出动态范围

- 输出动态范围：在规定的工作条件（电源电压、静态工作点等）下，放大电路能够输出无明显失真的信号电压或电流的范围。
- 研究输出动态范围的目的：保证晶体管工作在放大区



直流工作点随着基极电流的变化



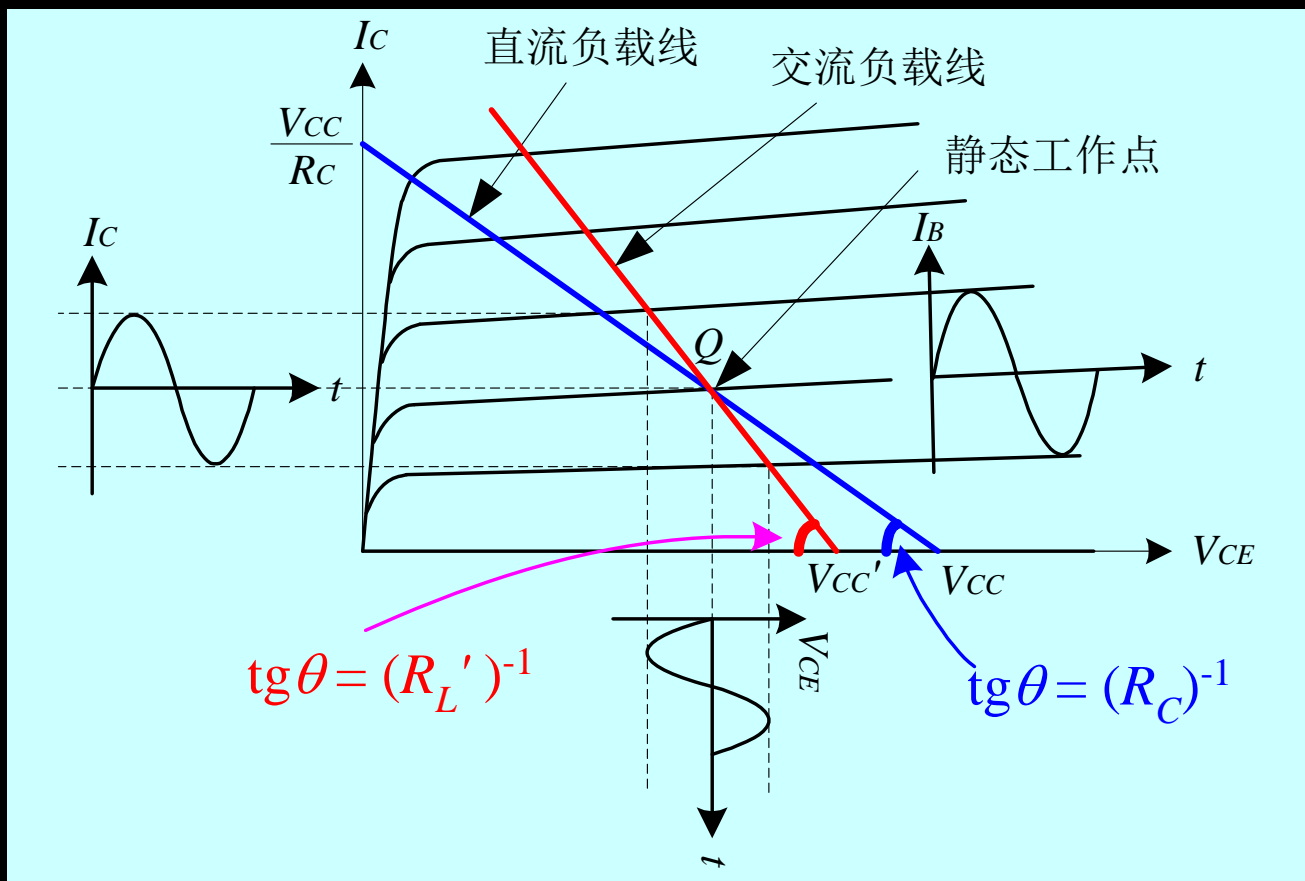


图解法分析输出动态范围

$$V'_{CC} = V_{CEQ} + \frac{I_{CQ}}{\tan \theta}$$

$$= V_{CEQ} + \frac{I_{CQ}}{1/R'_L}$$

$$V'_{CC} = \left[\frac{V_{CC}}{R_C} + \frac{V_{CEQ}}{R_L} \right] \cdot R'_L$$



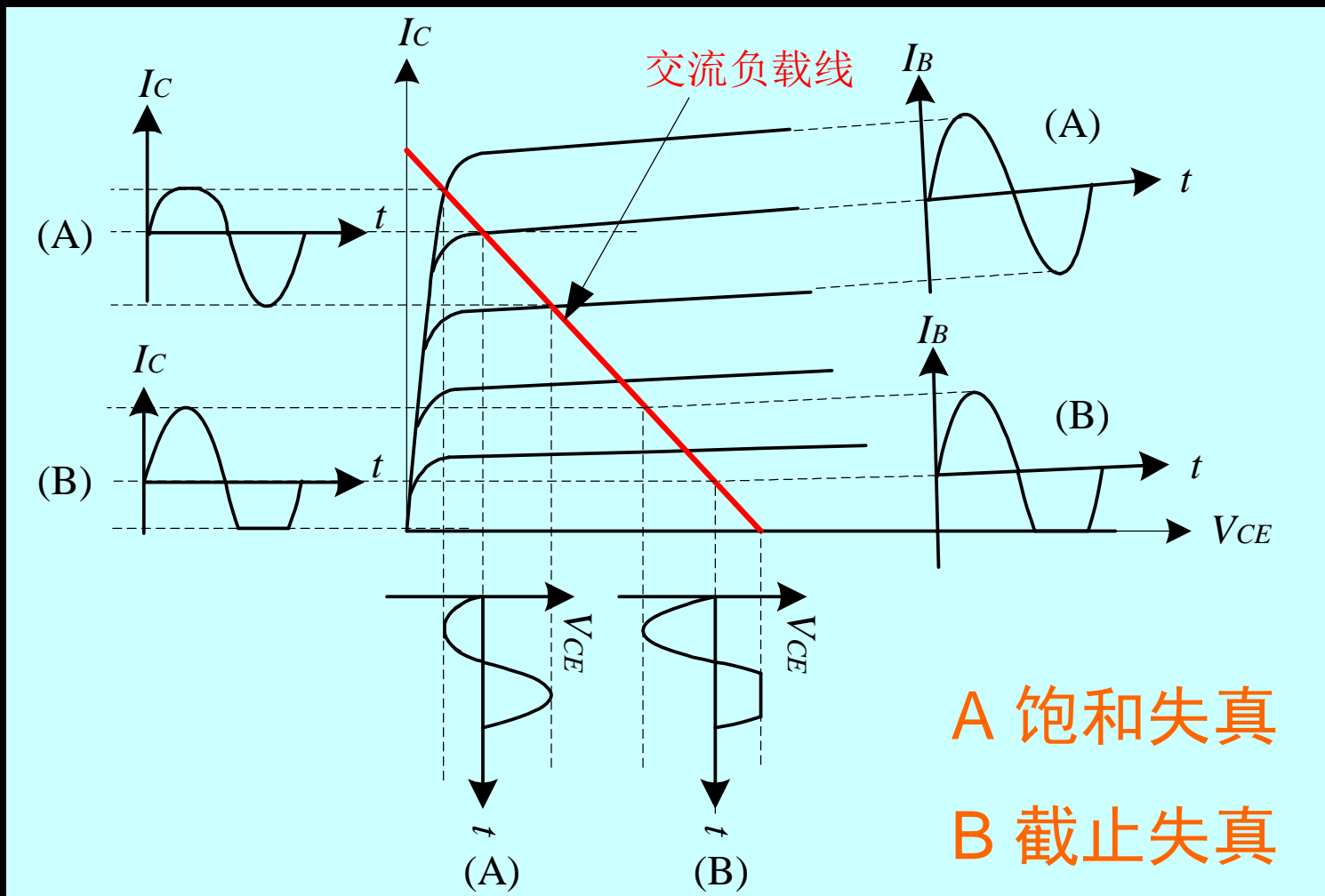


直流负载线和交流负载线

- 直接耦合情况：直流负载线与交流负载线是同一根线
- 阻容耦合情况：只有在空载情况下，直流负载线与交流负载线才合二为一



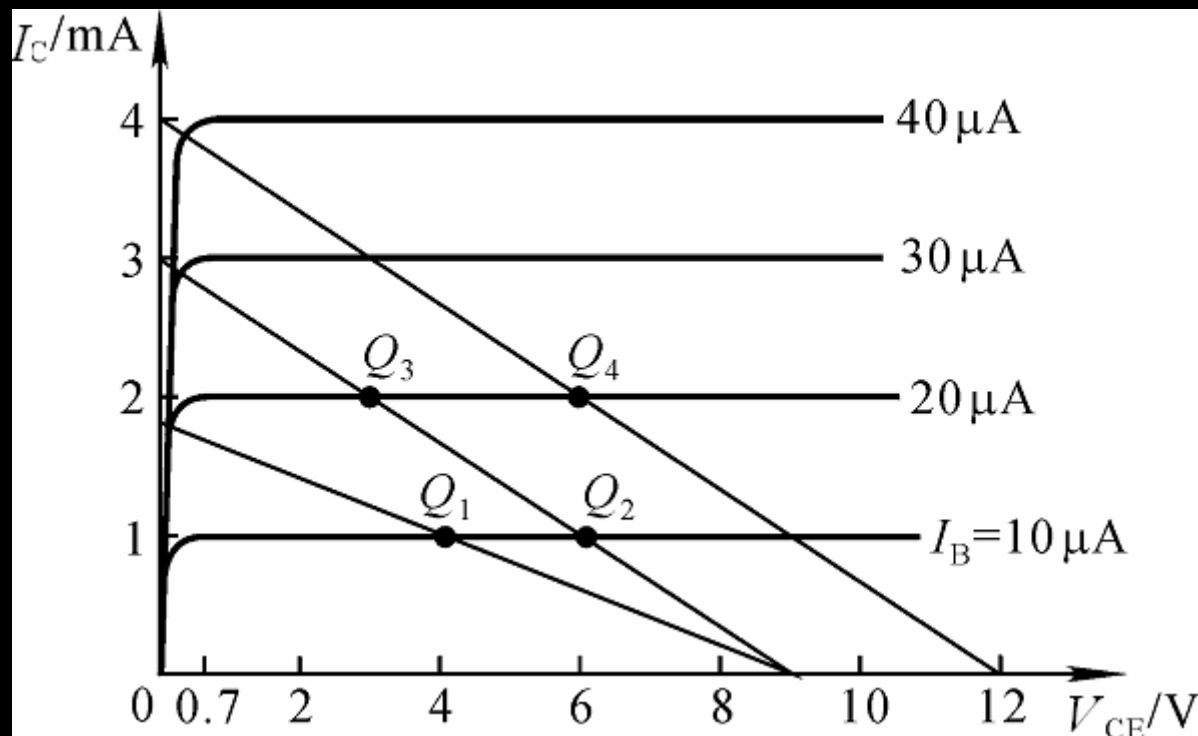
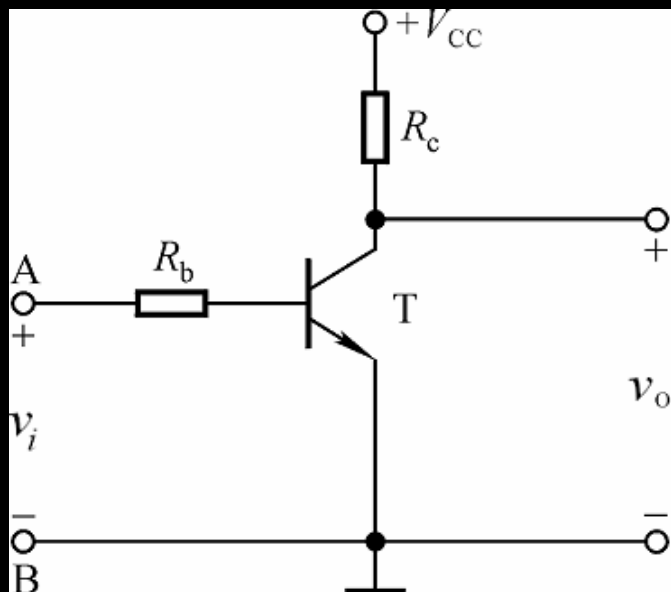
由于动态范围不够引起的输出失真





例子：共射极电路

1. 当静态工作点从 Q_1 移到 Q_2 ，从 Q_2 移到 Q_3 ，从 Q_3 移到 Q_4 ，分别是哪个参数变化造成的？参数是如何变化的？
2. 哪种情况下最容易产生截止失真？哪种情况下最容易产生饱和失真？哪种情况下输出动态范围最大？其值是多少？
3. Q_4 时， V_{CC} 是多少伏？ R_C 是多少千欧？





稳定工作点的偏置电路结构

- 影响偏置电路的因数：
 - 晶体管参数变化的影响
 - 温度变化的影响
- 稳定工作点的偏置电路结构
 - 电压负反馈式偏置电路
 - 电流负反馈式偏置电路

电压负反馈式偏置电路

如何稳定工作点?

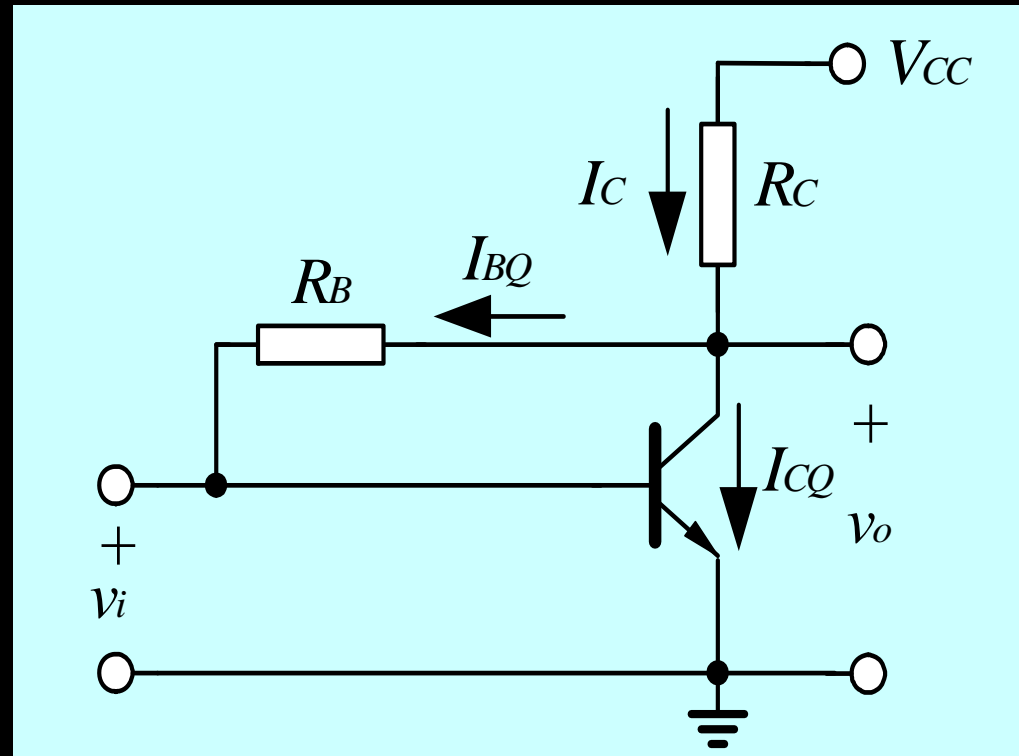
$$I_{CQ} \uparrow \rightarrow V_{Rc} \uparrow \rightarrow V_{CE} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$$

$$V_{CC} = I_C R_C + I_{BQ} R_B + V_{BE(on)}$$

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

$$I_C = I_{CQ} + I_{BQ}$$

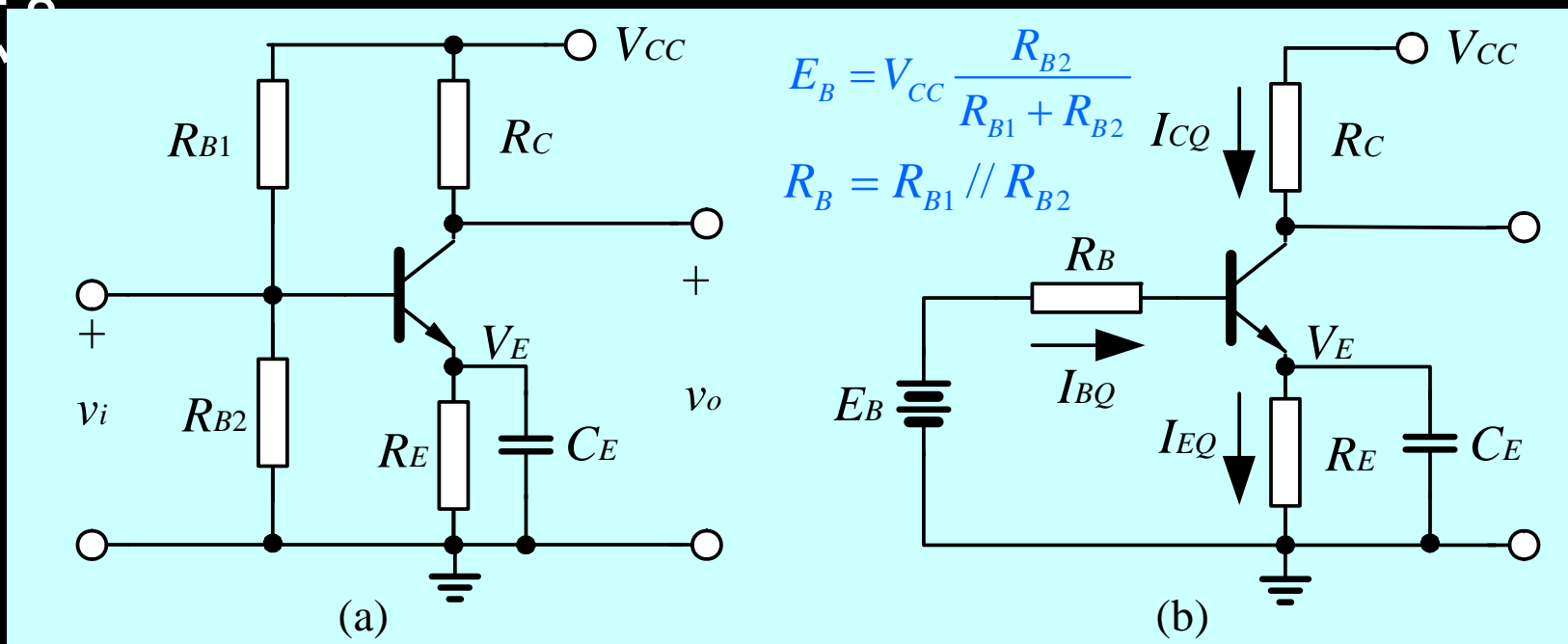
$$I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{\frac{1 + \beta}{\beta} R_C + \frac{R_B}{\beta}}$$



电流负反馈式偏置电路

如何稳定工作点

$$I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow V_E \uparrow \rightarrow V_{BEQ} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$$



$$E_B = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$R_B = R_{B1} // R_{B2}$$

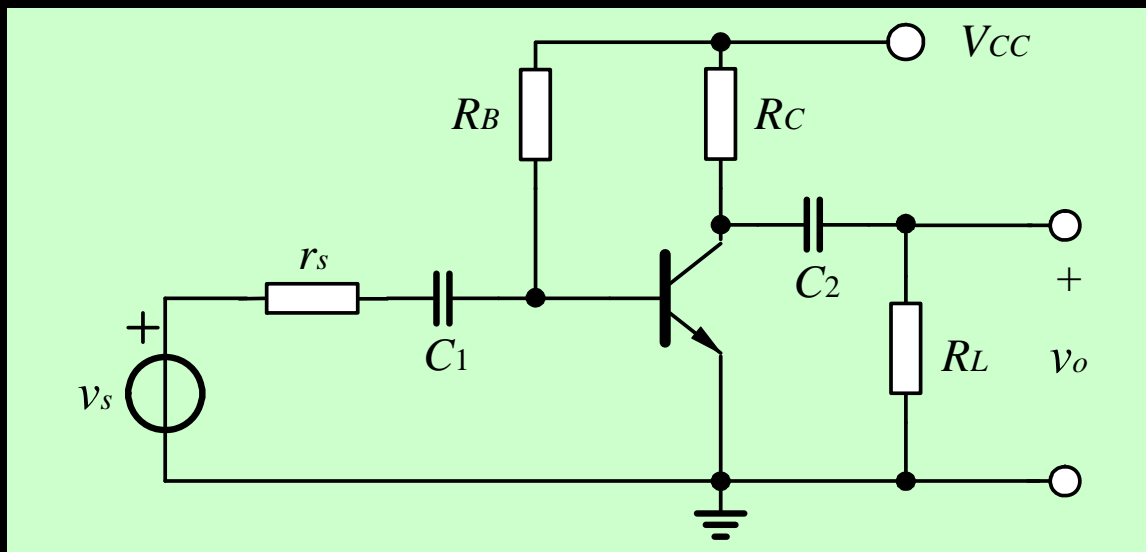
$$R_{B1} // R_{B2} \ll (1 + \beta) R_E \quad I_{CQ} \approx I_{EQ} \approx \frac{E_B - V_{BE(on)}}{R_E} \quad \text{与 } \beta \text{ 无关}$$



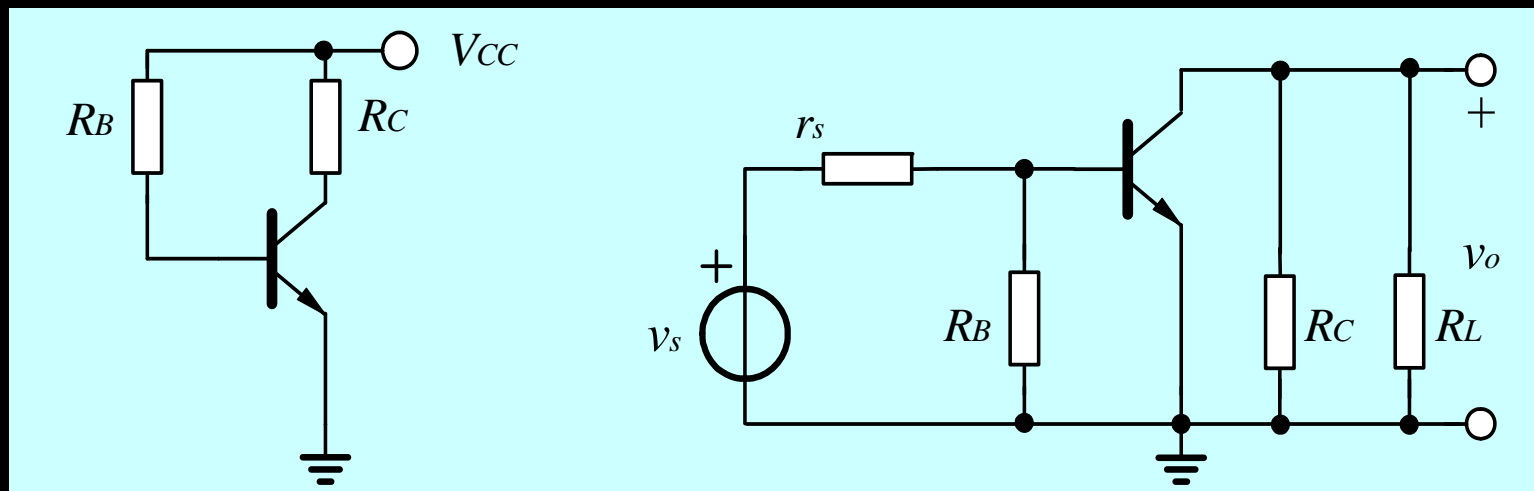
交流小信号分析

- 在直流偏置基础上叠加交流小信号
- 只考虑交流回路
 - 足够大的电容短路，足够大的电感开路
 - 直流电压源短路，直流电流源开路
- 线性化近似
 - 晶体管用工作点附近交流小信号等效模型代替
- 对线性电路求解

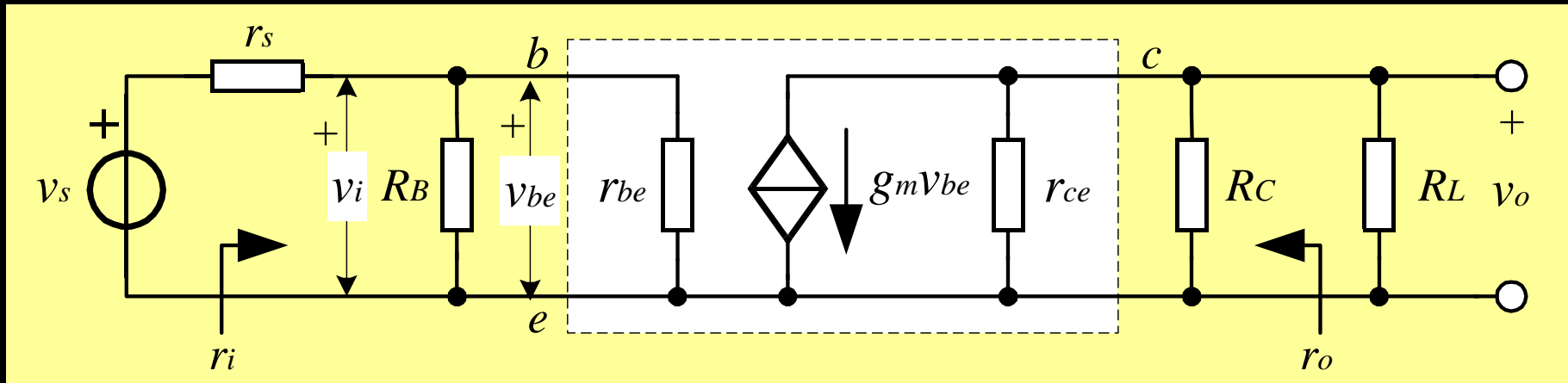
共射放大器的低频小信号等效电路



直流回路



交流回路



晶体管参数 $g_m = I_{CQ} / V_T$ $r_{be} = \beta / g_m$ $r_{ce} = V_A / I_{CQ}$

电路特性参数

$$\left\{ \begin{aligned} r_i &= R_B // r_{be} & r_o &= R_C // r_{ce} \\ A_v &= \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_L' = -g_m (R_L // R_C // r_{ce}) \\ A_{vs} &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = A_v \frac{r_i}{r_s + r_i} \end{aligned} \right.$$



单管放大器的一般分析过程

- 根据要放大信号的特征，区分直流回路与交流回路
- 求晶体管的静态工作点（保证晶体管工作在放大区），并求得晶体管小信号模型参数
- 画出交流小信号等效电路，其中晶体管用其交流小信号模型代替
- 在交流小信号等效电路中，求出输入输出的电压、电流关系，最后得到放大器的性能指标

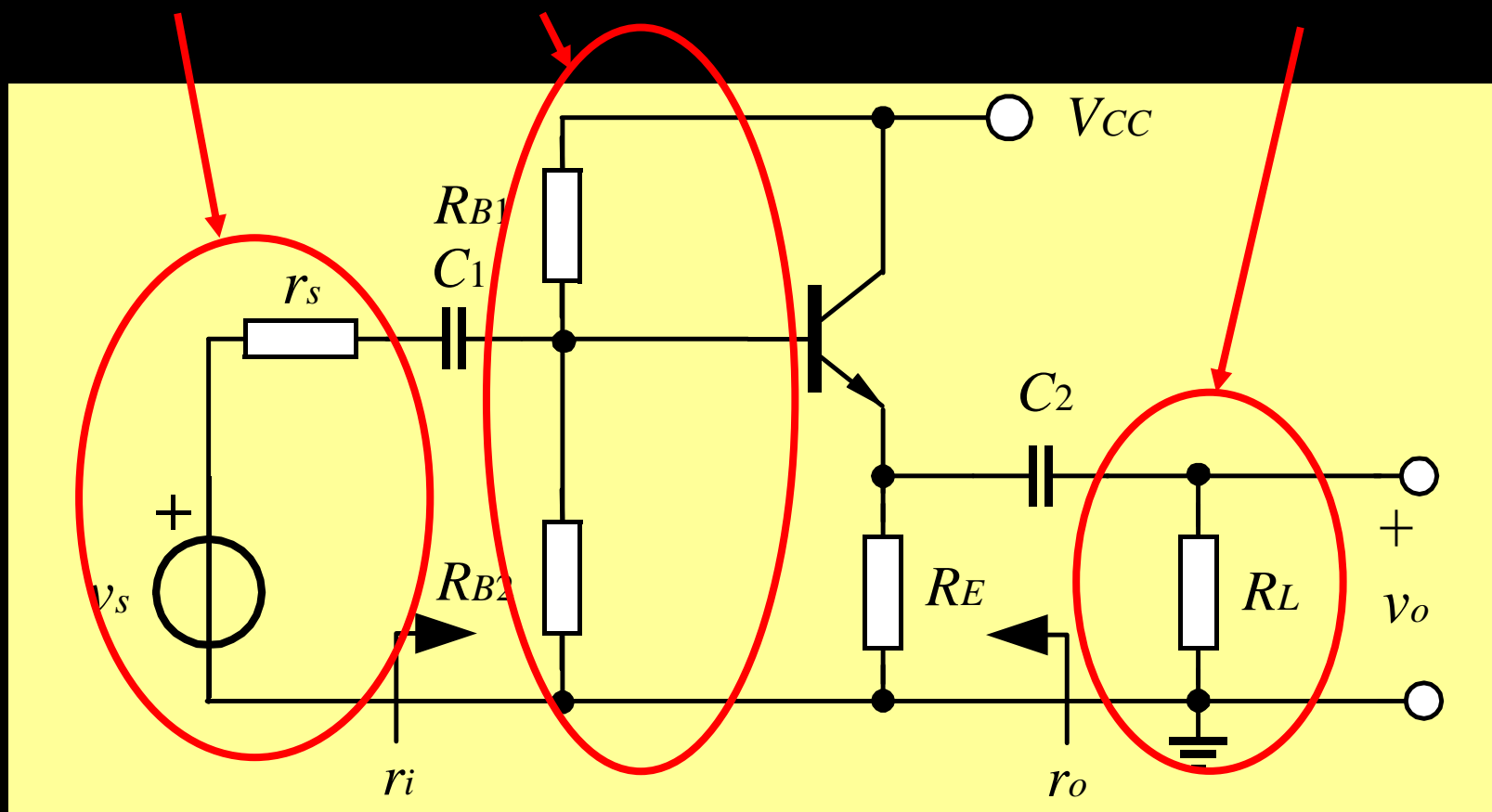


共集电极放大器

信号源

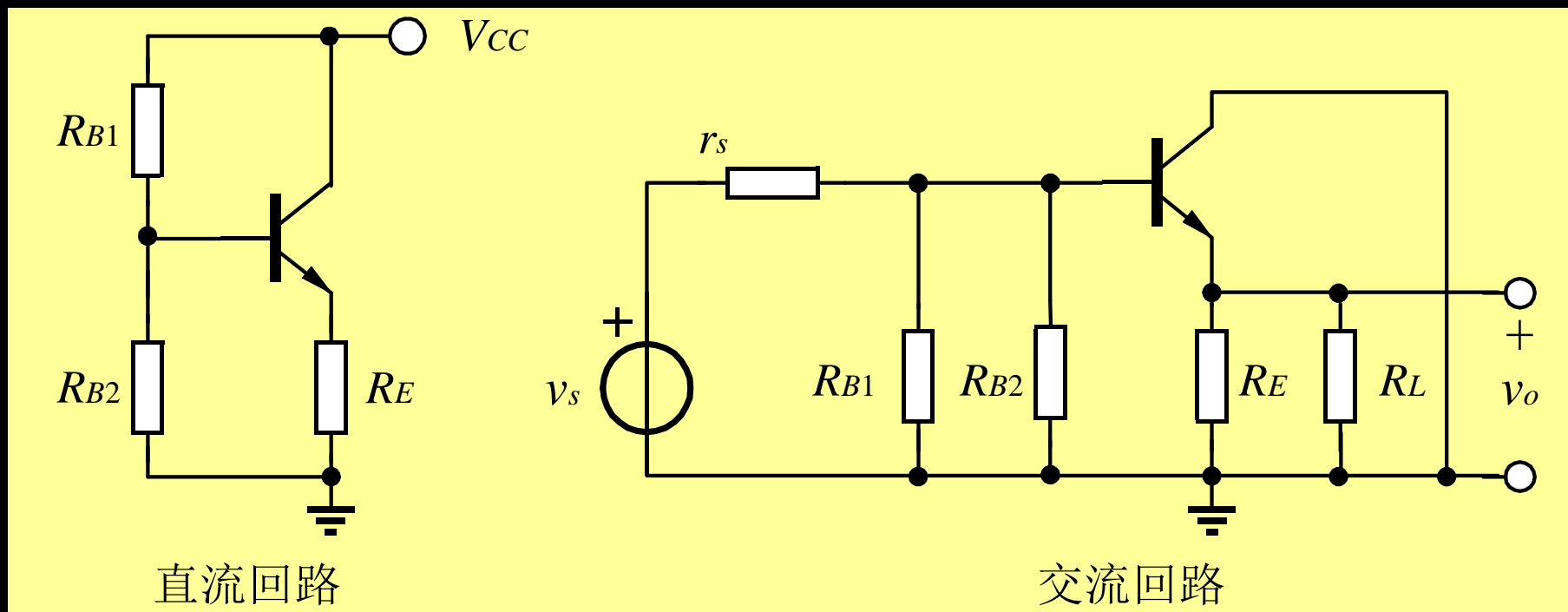
直流偏置

负载



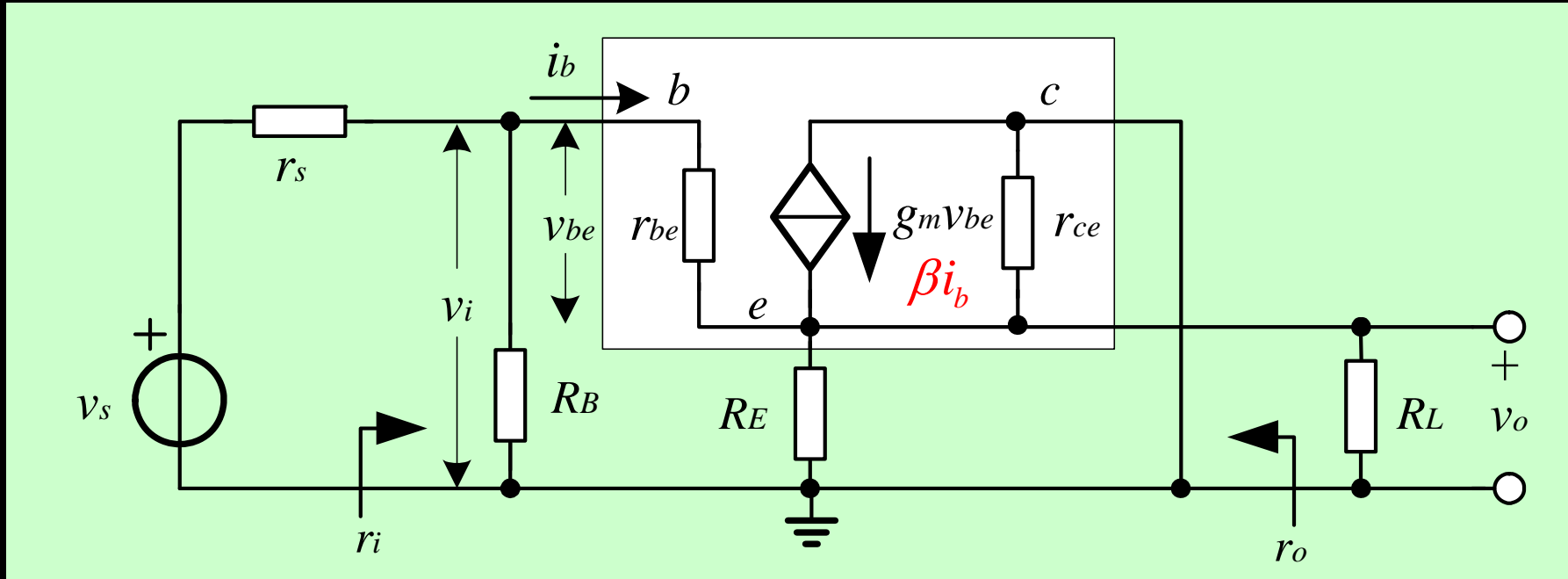


共集电极放大器的直流与交流回路



注：直流回路的解法已经在第二章解决

共集放大器的交流小信号等效电路(1)

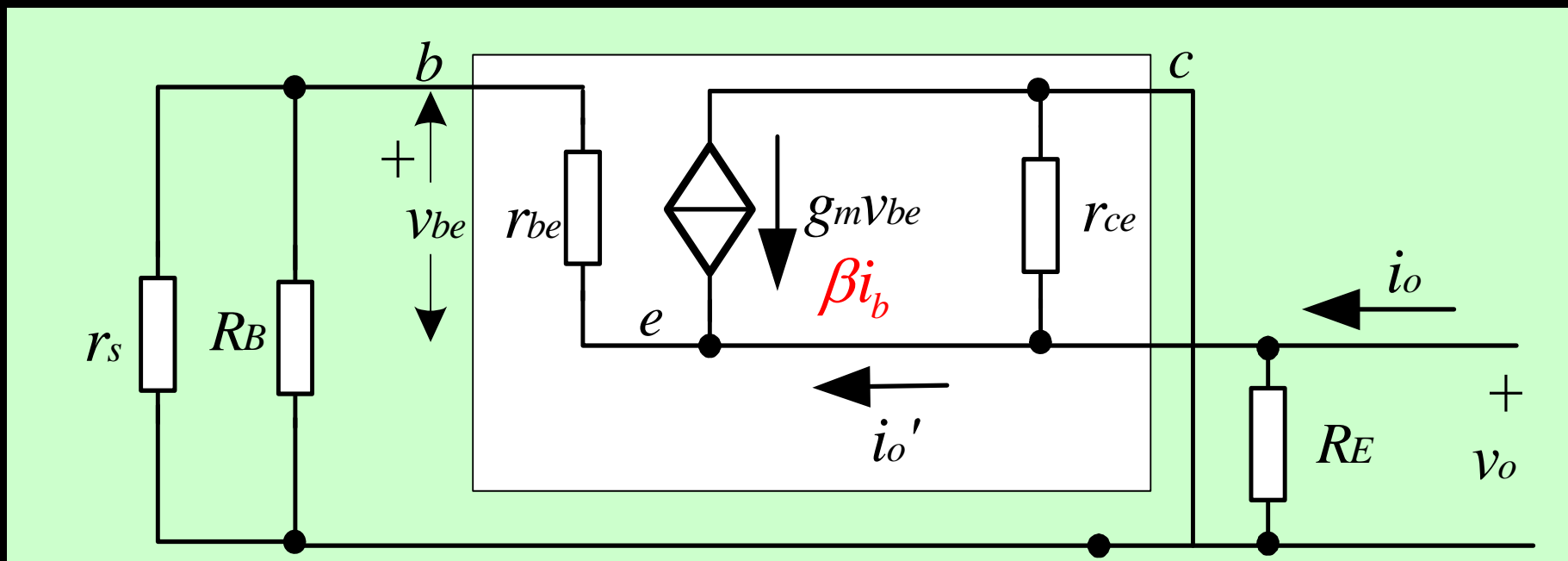


计算电压增益 A_v ，输入阻抗 r_i

注意：晶体管模型中受控源的控制电压不等于 v_i



共集放大器的交流小信号等效电路(2)



计算输出阻抗 r_o



共集放大器的特性

- 电压增益
(近似为1)

$$R_L' = r_{ce} // R_C // R_L$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m \frac{1+\beta}{\beta} R_L'}{1 + g_m \frac{1+\beta}{\beta} R_L'} \approx \frac{g_m R_L'}{1 + g_m R_L'}$$

- 输入电阻
(若不考虑 R_B
则可以很高)

$$r_i = R_B // \left(\frac{v_i}{i_b} \right) = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) R_L']$$

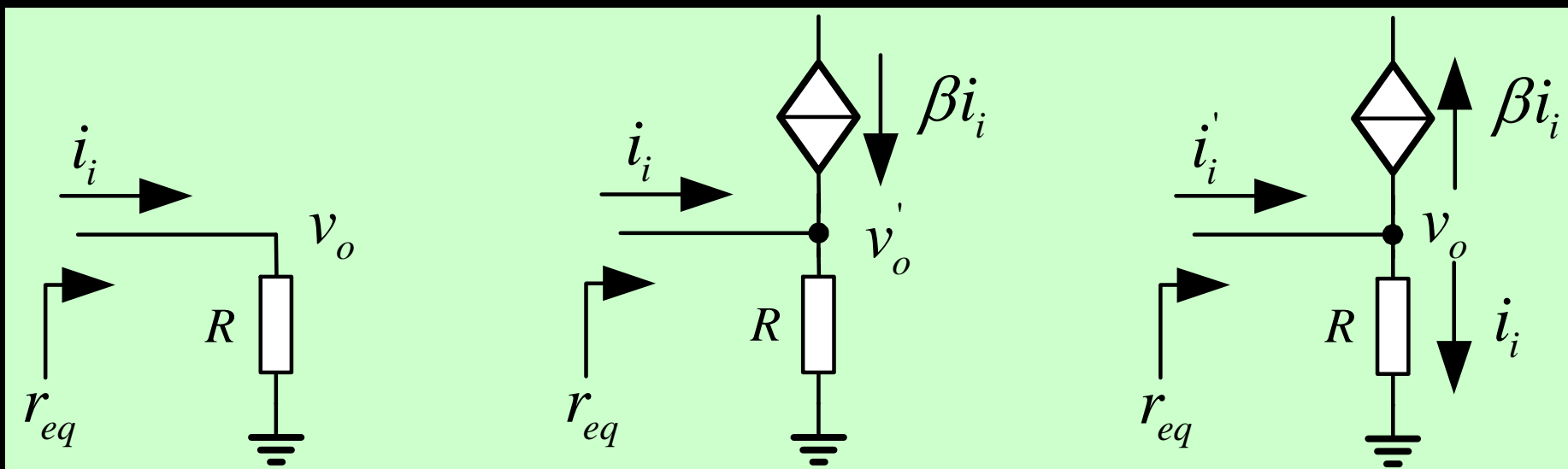
- 输出电阻
(很低)

$$r_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{r_{be} + r_s // R_B}{1 + \beta} // r_{ce} // R_E$$

等效电阻的观察法

电阻倍增

电阻倍减



$$v'_o = (i_i + \beta i_i) \cdot R$$

$$i'_i = i_i + \beta i_i$$

$$R_{eq} = R = \frac{v_o}{i_i}$$

$$R_{eq} = \frac{v'_o}{i_i} = (1 + \beta)R$$

$$R_{eq} = \frac{v_o}{i'_i} = \frac{R}{1 + \beta}$$

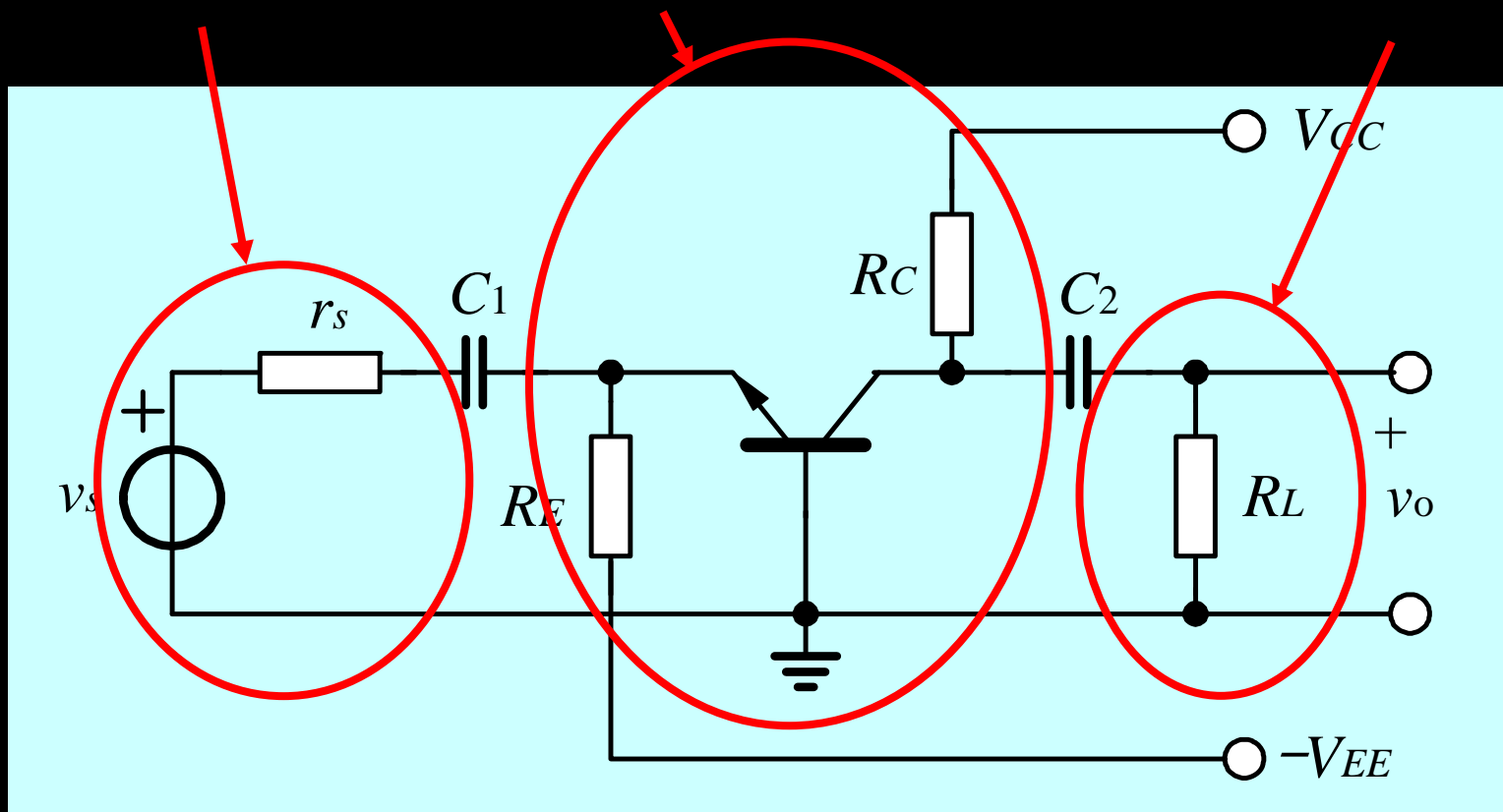


共基极放大器

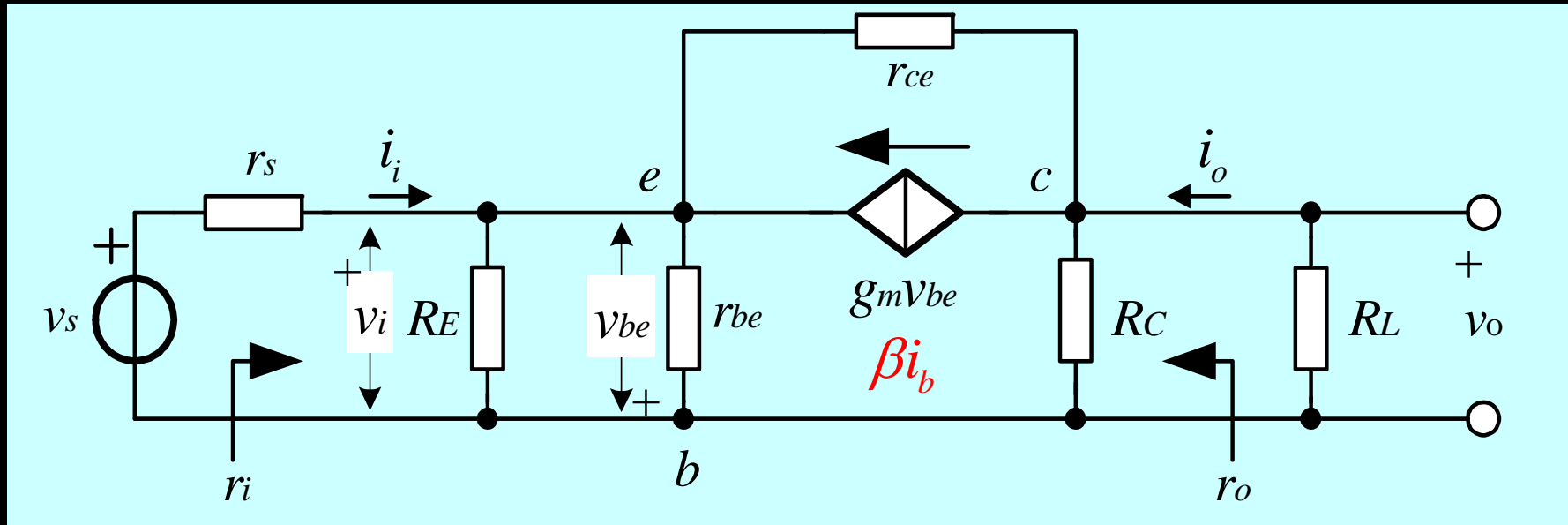
信号源

直流偏置

负载

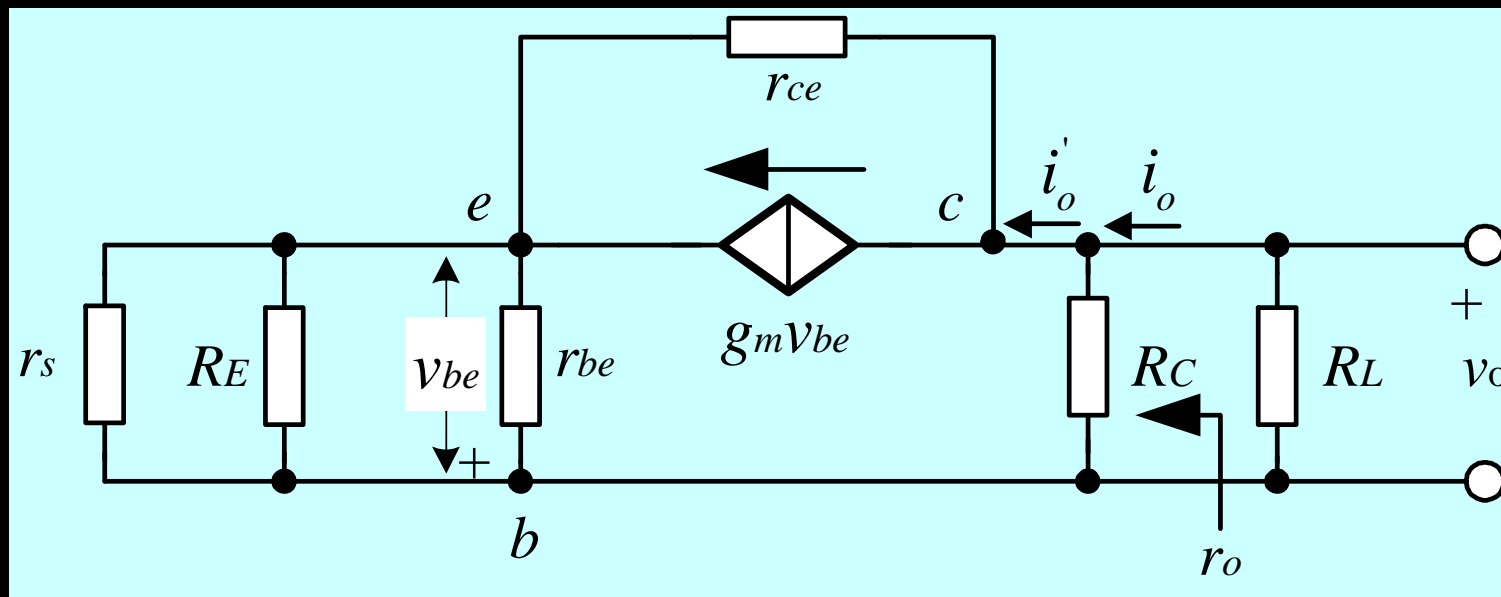


共基放大器的交流小信号等效电路 (1)



- 晶体管用共射极模型代替
- 计算电压增益 A_v ，输入阻抗 r_i

共基放大器的交流小信号等效电路 (2)



计算输出阻抗 r_o



共基放大器的特性

- 电压增益（大小与共射相同）

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \left(g_m + \frac{1}{r_{ce}} \right) (R_C // R_L // r_{ce}) \approx g_m (R_C // R_L // r_{ce})$$

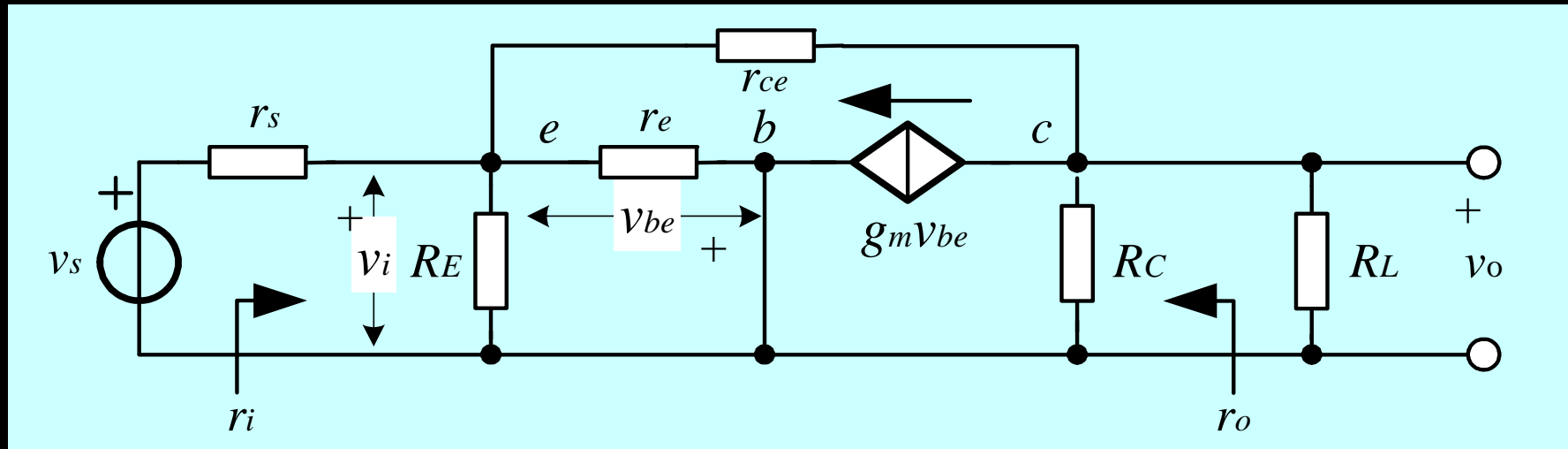
- 输入电阻（忽略 r_{ce} 的影响，很低）

$$r_i \approx R_E // r_{be} // \frac{1}{g_m} = R_E // \frac{r_{be}}{1 + \beta} = R_E // r_e$$

- 输出电阻
(很高)

$$r_o = \frac{v_o}{i_o} = R_C // \left(r_{ce} + (1 + g_m r_{ce}) (r_s // R_E // r_{be}) \right)$$

共基放大器的交流小信号等效电路 (3)



- 补充作业：采用晶体管的共基极模型，计算电压增益 A_v ，输入阻抗 r_i 和输出阻抗 r_o 。



三种结构的比较

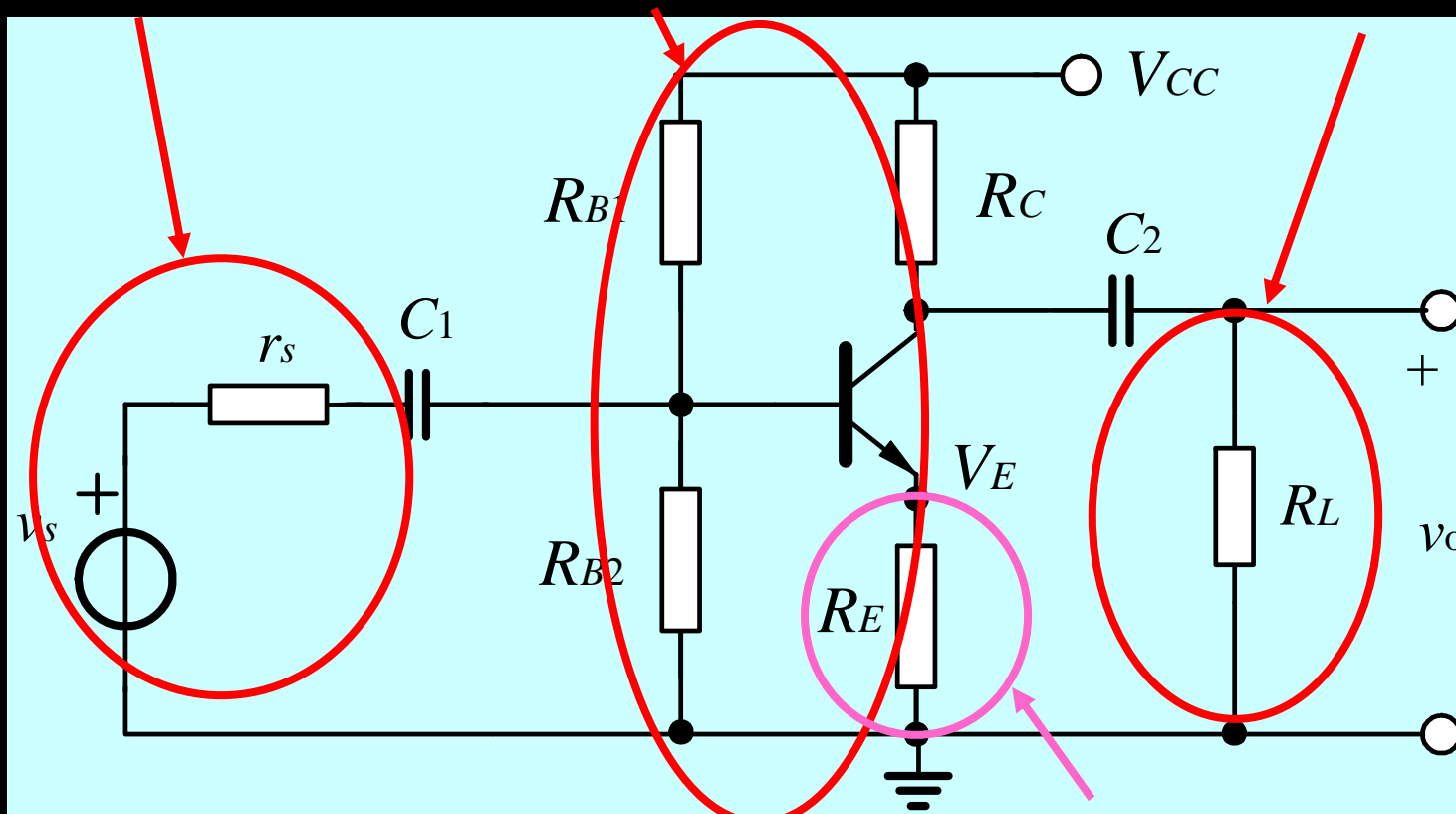
性能指标	共射电路	共集电路	共基电路
电压放大系数	高	≈ 1	高
电流放大系数	高	高	≈ 1
输入电阻	中等	高	低
输出电阻	高	低	高
应用场合	单元放大器	跟随器	宽频放大器
高频特性	差	好	好

带射极电阻的共射放大器

信号源

直流偏置

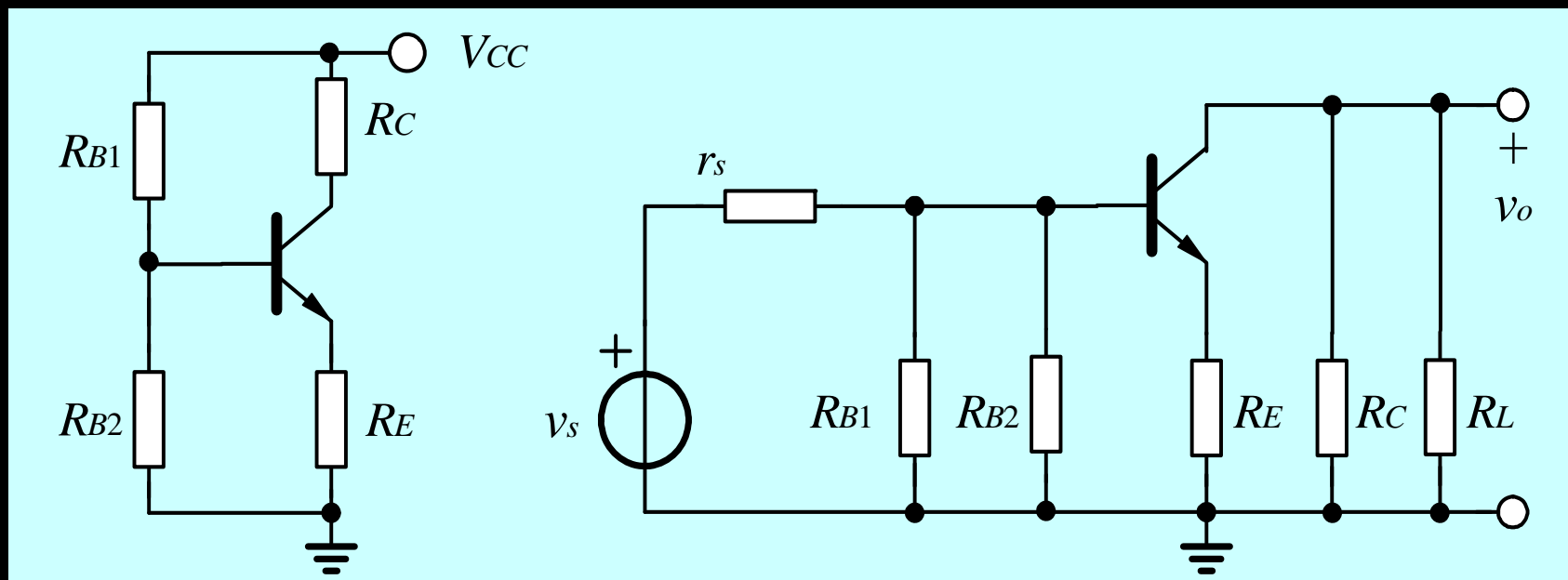
负载



射极电阻



直流与交流回路

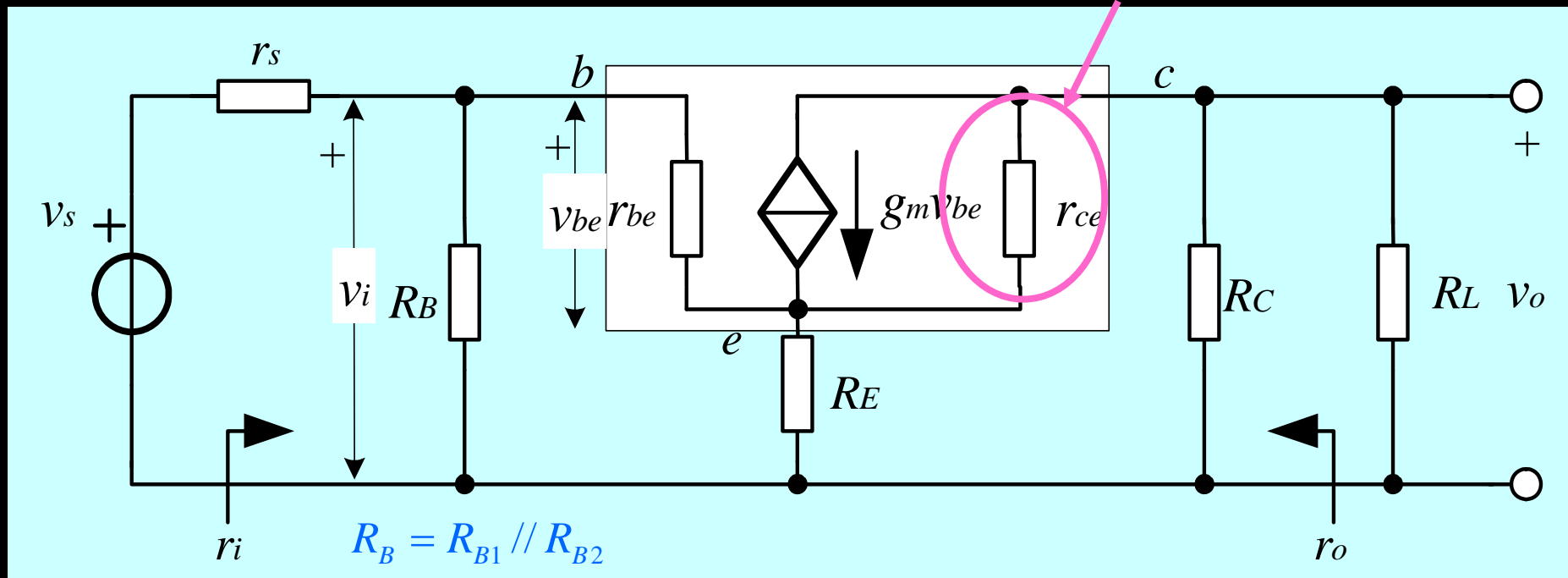


直流回路

交流回路

交流小信号等效电路 (1)

忽略掉

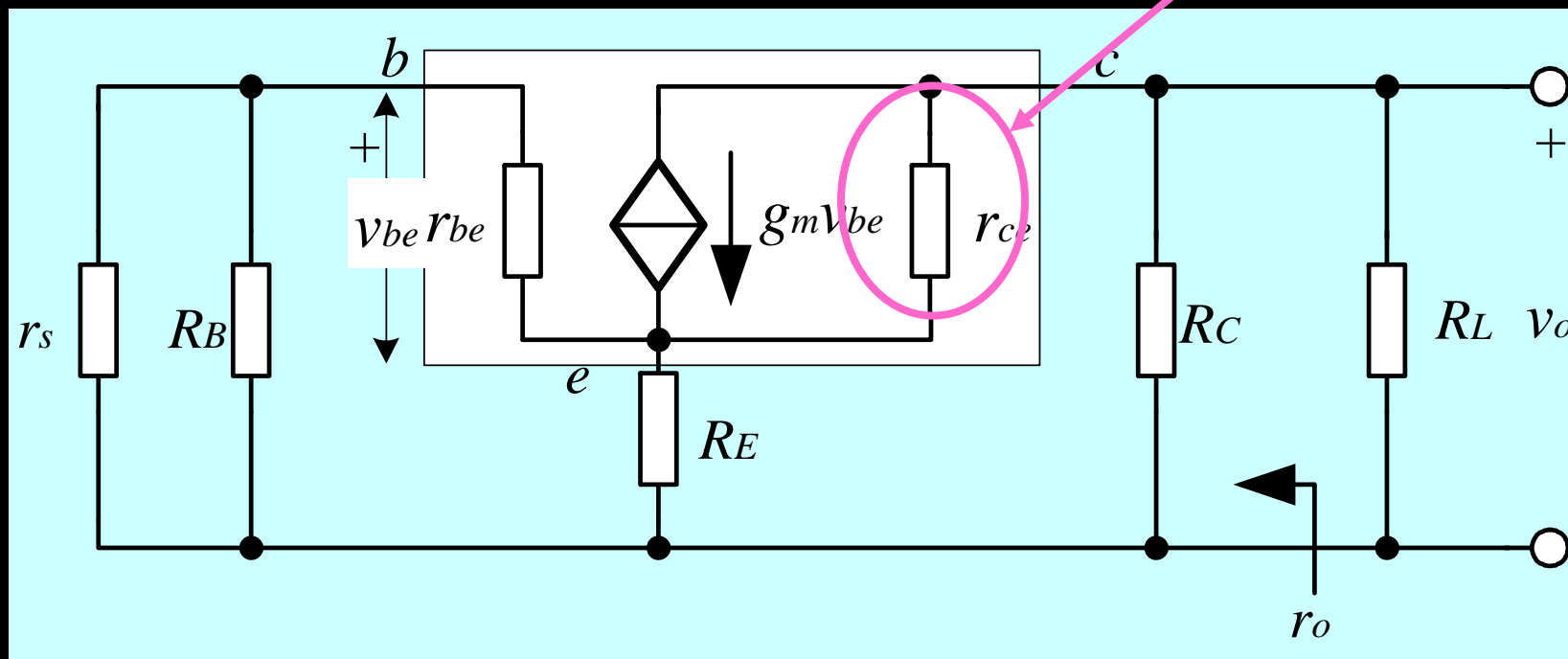


- 晶体管用共射极模型代替，忽略 r_{ce} 的影响
- 计算电压增益 A_v ，输入阻抗 r_i



交流小信号等效电路 (2)

忽略掉



计算输出阻抗 r_o



带射极电阻的共射放大器的特性

■ 电压增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m}{1 + g_m R_E} (R_C // R_L)$$

■ 输入电阻（忽略 r_{ce} 的影响，很高）

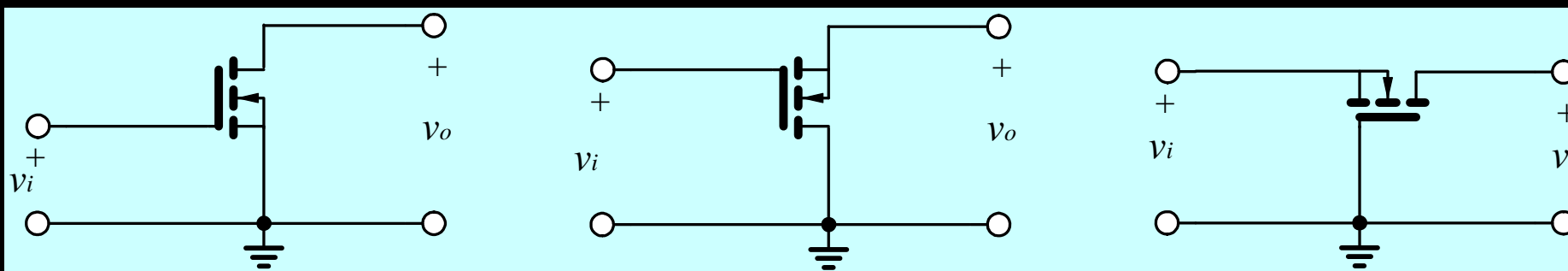
$$r_i \approx R_B // (r_{be} + (1 + \beta) R_E)$$

■ 输出电阻

$$r_o = R_C // (r_{ce} + (1 + g_m r_{ce}) R_E) \approx R_C$$

场效应管的单管放大器的类型

- FET单管放大器
 - 共源极放大器
 - 共漏极放大器
 - 共栅极放大器



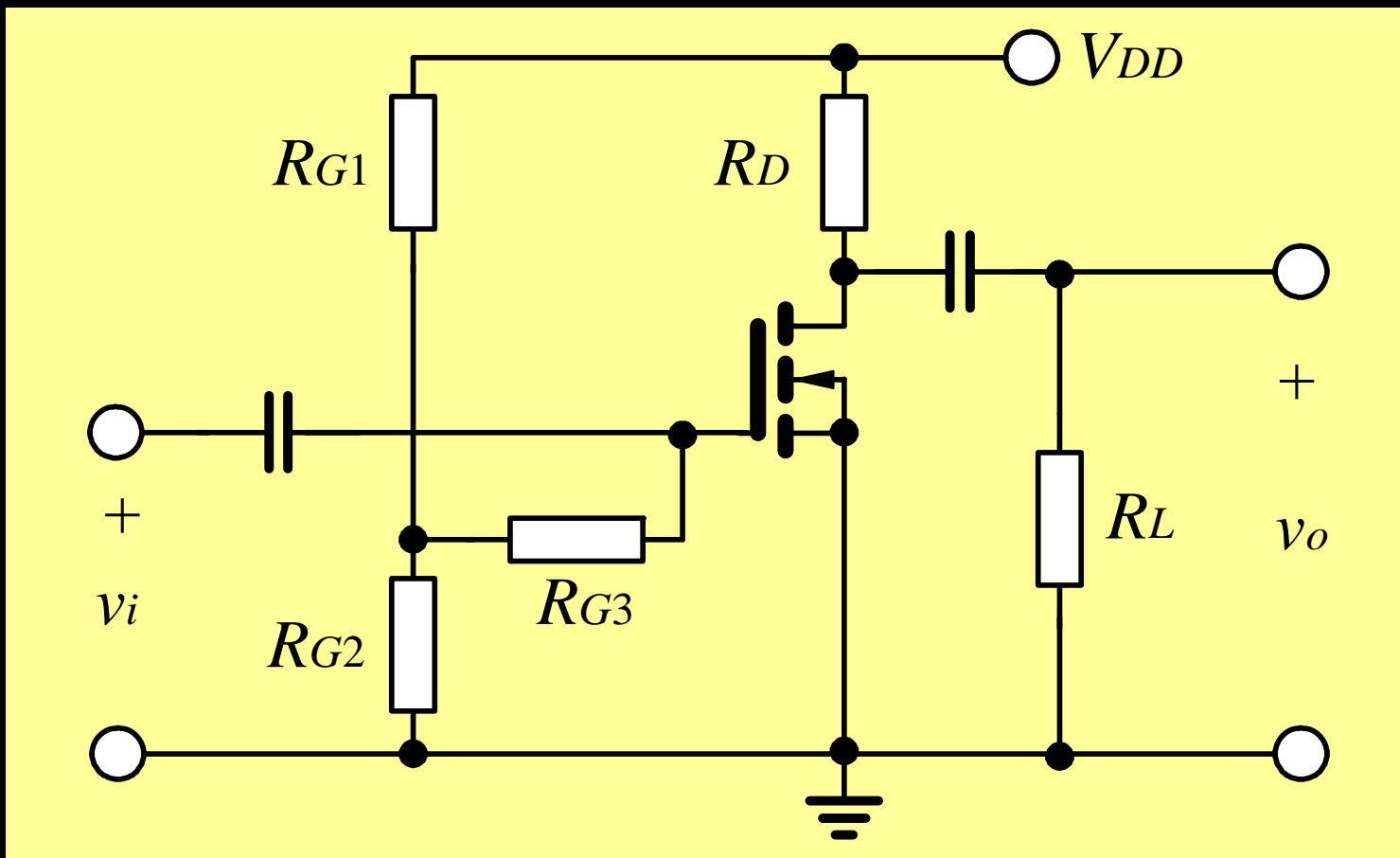
共源极

共漏极

共栅极



共源极放大器



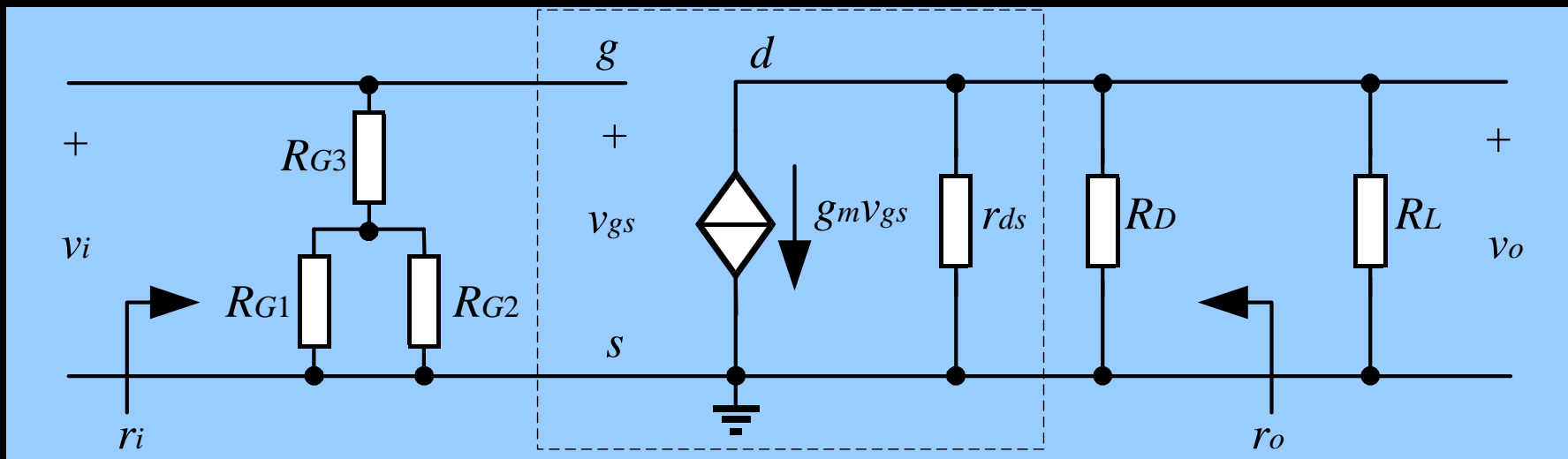


FET放大器的偏置

- 已经在第2章解决
- 一般用估算法计算：用场效应管的大信号模型（ I_D 的表达式）求解方程，要注意得到的解中有一个是多余的
- 也可以用图解法求解，方法与BJT放大器的完全一致



共源放大器的交流小信号等效电路



$$r_i = (R_{G1} // R_{G2}) + R_{G3}$$

$$r_o = r_{ds} // R_D$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m (r_{ds} // R_D // R_L) = -g_m R_L'$$

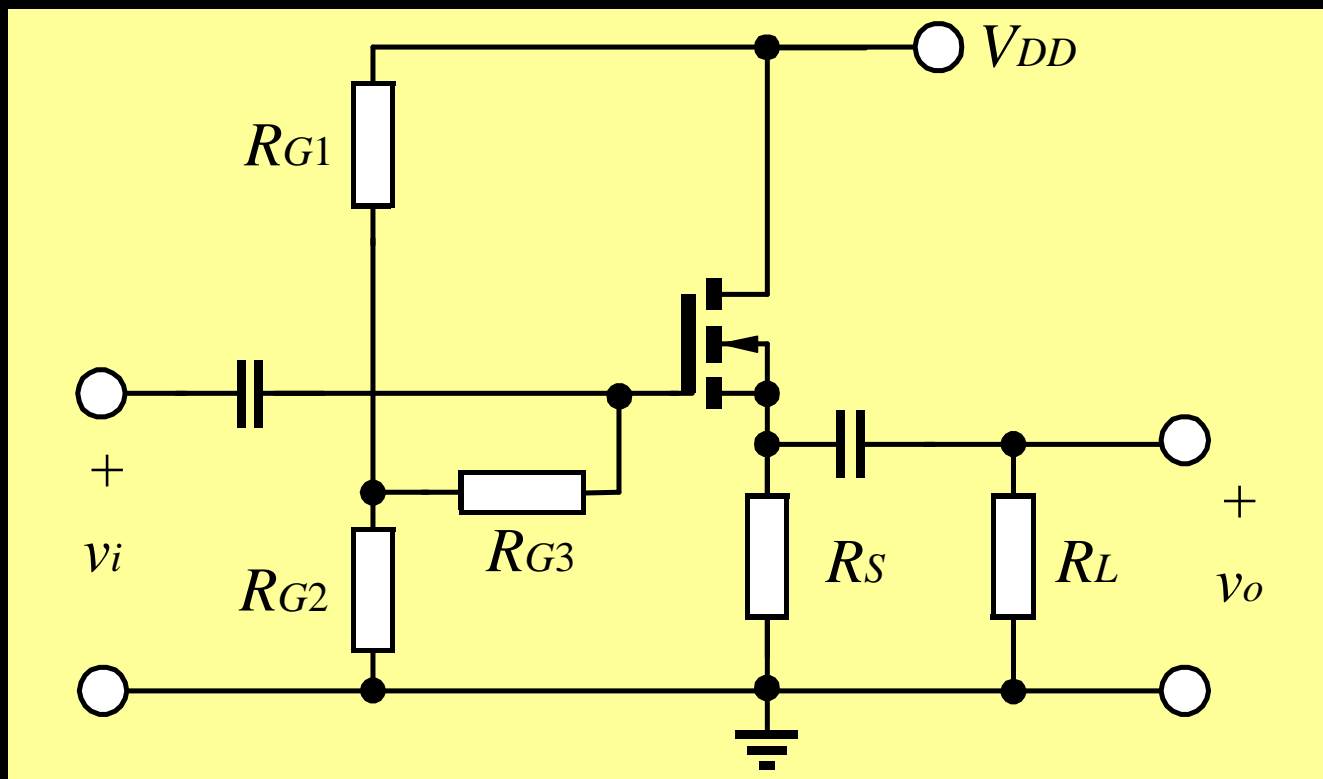


共源放大器的特点

- 输入电阻很高。若不考虑偏置电阻，可以达到极高的数值
- 电压增益的形式类似共发射极放大器，但是一般FET的 g_m 较小，所以电压增益小于共射放大器
- 输出电阻的形式也类似共射放大器
- 只有电压控制模式（FET放大器共同特点）

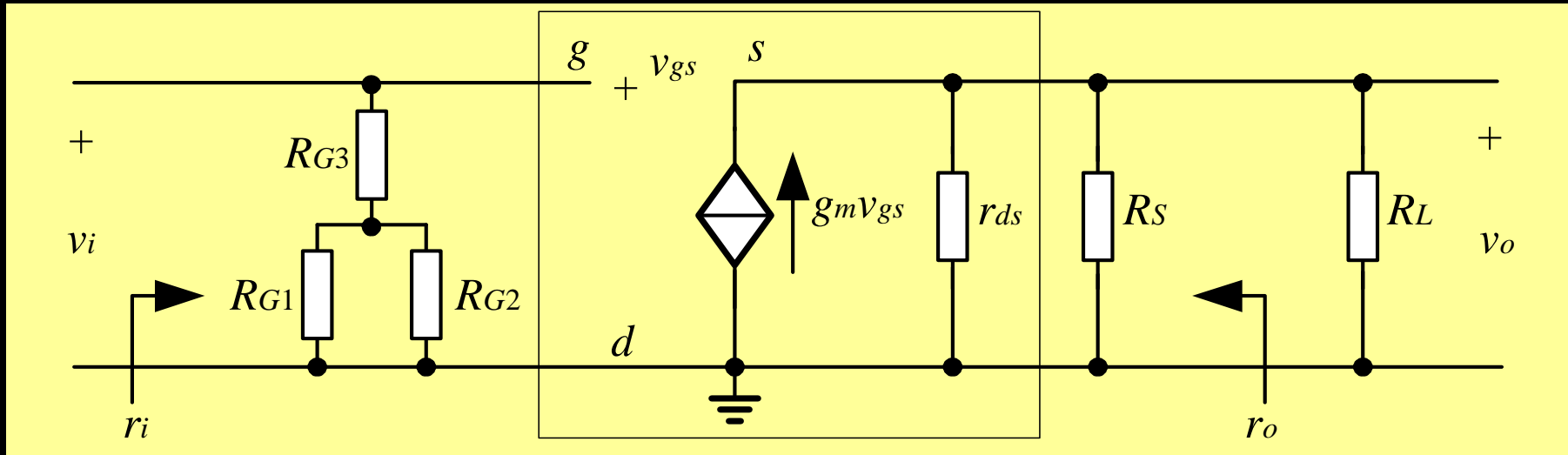


共漏极放大器





共漏放大器的交流小信号等效电路



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m R_L'}{1 + g_m R_L'}$$

$$r_i = (R_{G1} // R_{G2}) + R_{G3}$$

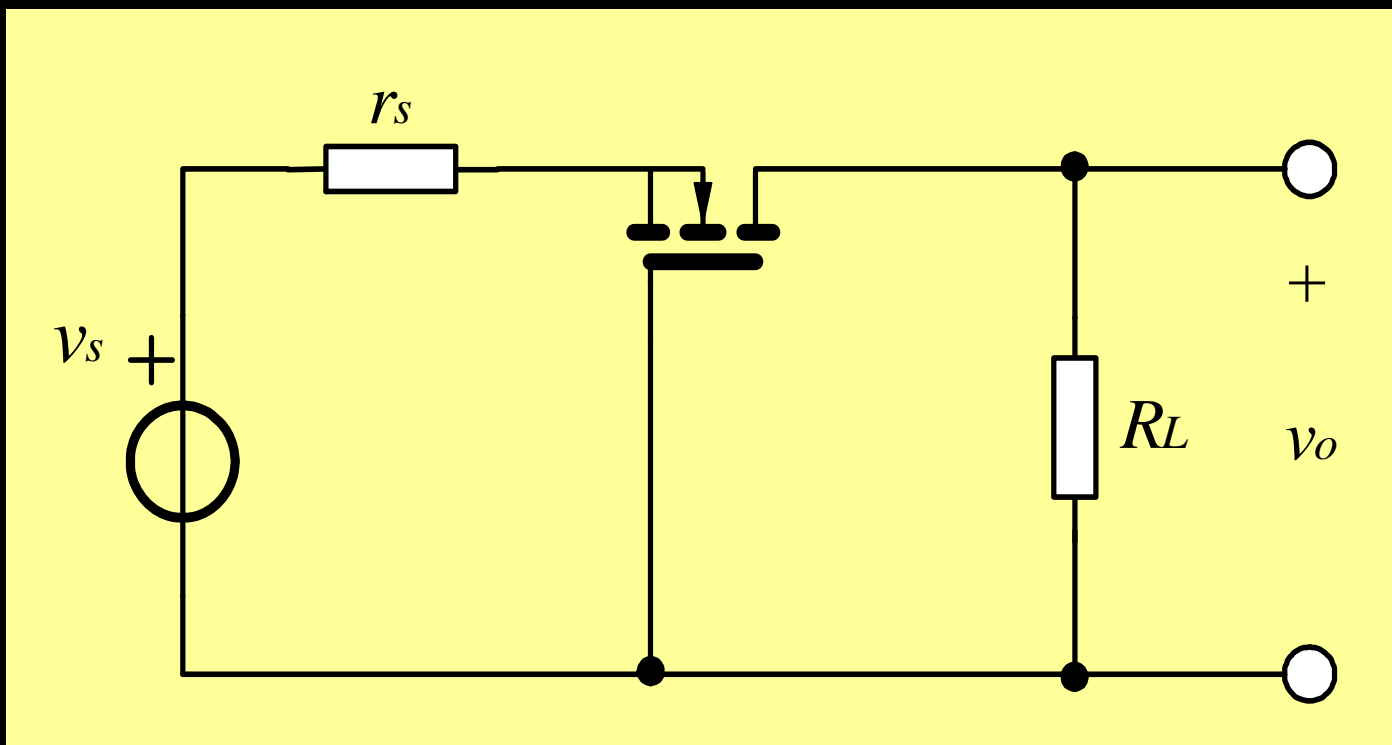
$$r_o = \frac{1}{\frac{1}{r_{ds} // R_S} + g_m} = \frac{1}{g_m} // r_{ds} // R_S$$



共漏放大器的特点

- 输入电阻很高。若不考虑偏置电阻，可以达到极高的数值
- 电压增益的形式类似共集电极放大器，但是一般FET的 g_m 较小，所以电压增益小于1
- 输出电阻较低，且与信号源内阻无关

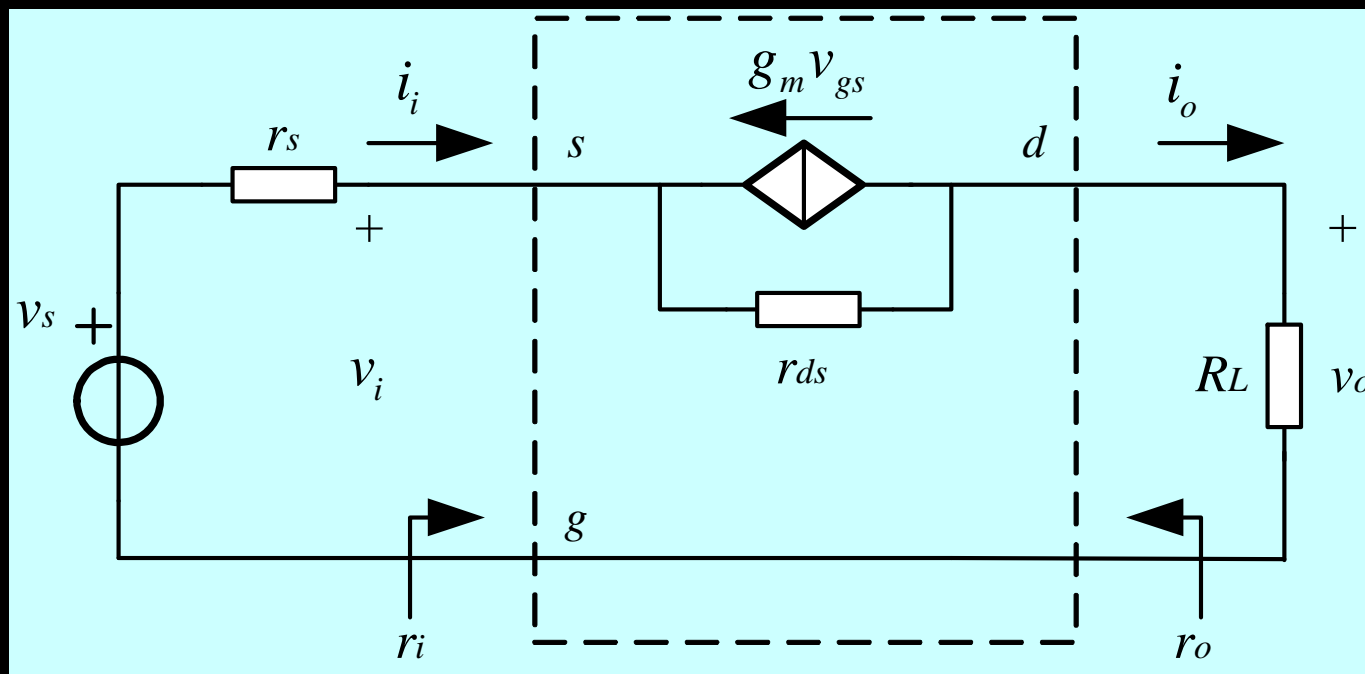
共栅极放大器



通常在集成电路内部运用较多，
忽略确定工作点的电压电路和偏置电路



共栅放大器的交流小信号等效电路



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \left(\frac{1}{r_{ds}} + g_m \right) (r_{ds} // R_L)$$

$$r_i = \frac{r_{ds} + R_L}{1 + g_m r_{ds}}$$

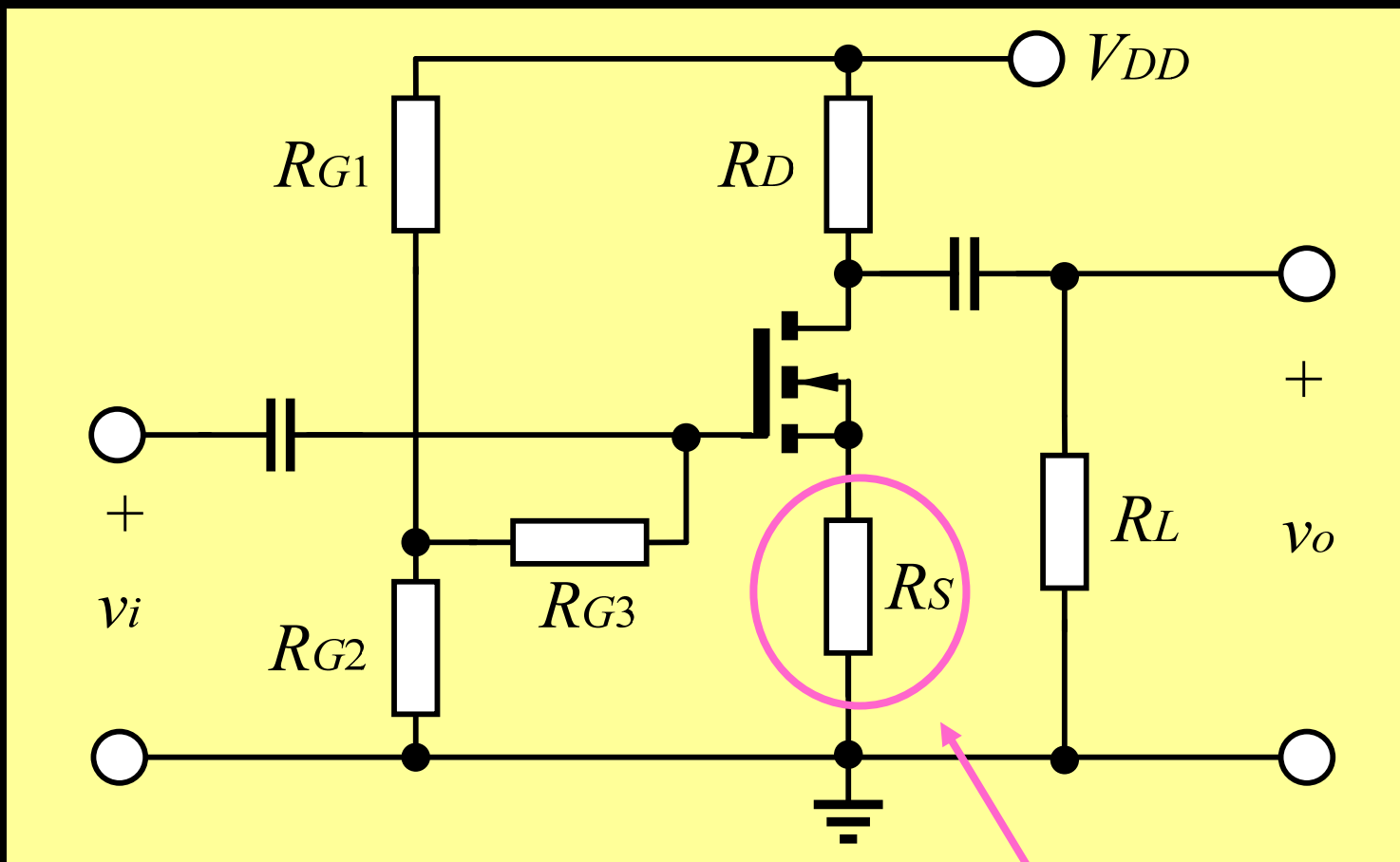
$$r_o = r_{ds} + (1 + g_m r_{ds}) r_s$$



共栅放大器的特点

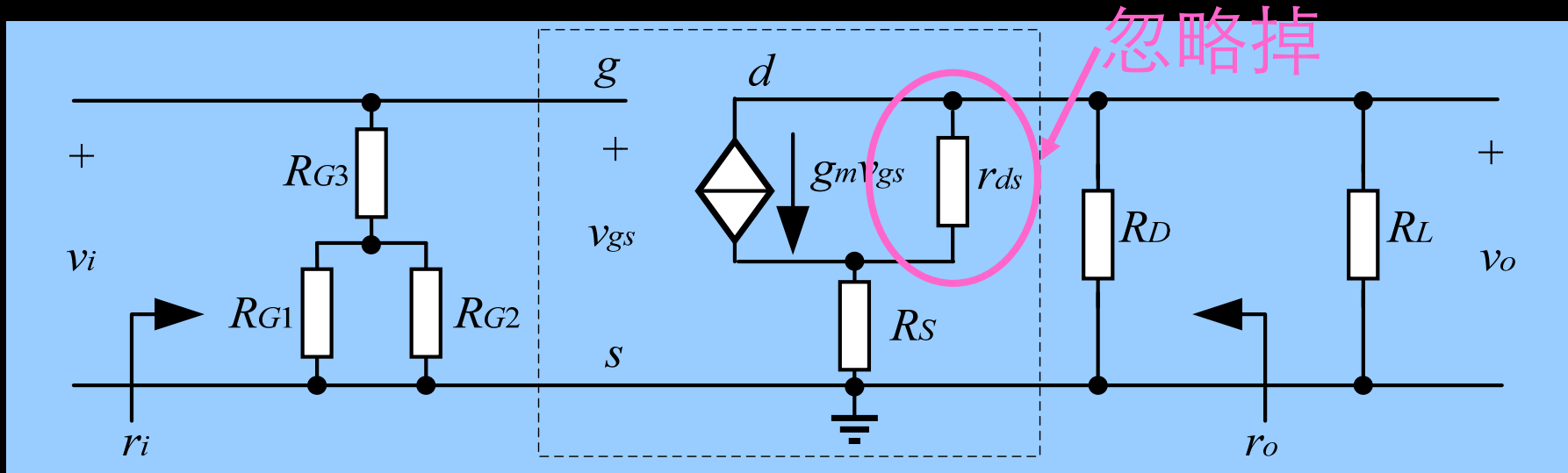
- 电压增益几乎与共源放大器一致，但是输入输出极性相同
- 输入电阻与 r_{ds} 和 R_L 有关，当 r_{ds} 很大时趋于 $1/g_m$ 。
- 输出电阻中由于增加了 $(1 + g_m r_{ds})r_s$ 项，所以比共源放大器大许多

带源极电阻的共源放大器



源极电阻

带源极电阻的共源放大器的小信号等效电路



$$r_i = (R_{G1} // R_{G2}) + R_{G3}$$

$$r_o = (r_{ds} + (1 + g_m r_{ds}) R_E) // R_D$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{g_m}{1 + g_m R_E} (R_D // R_L)$$

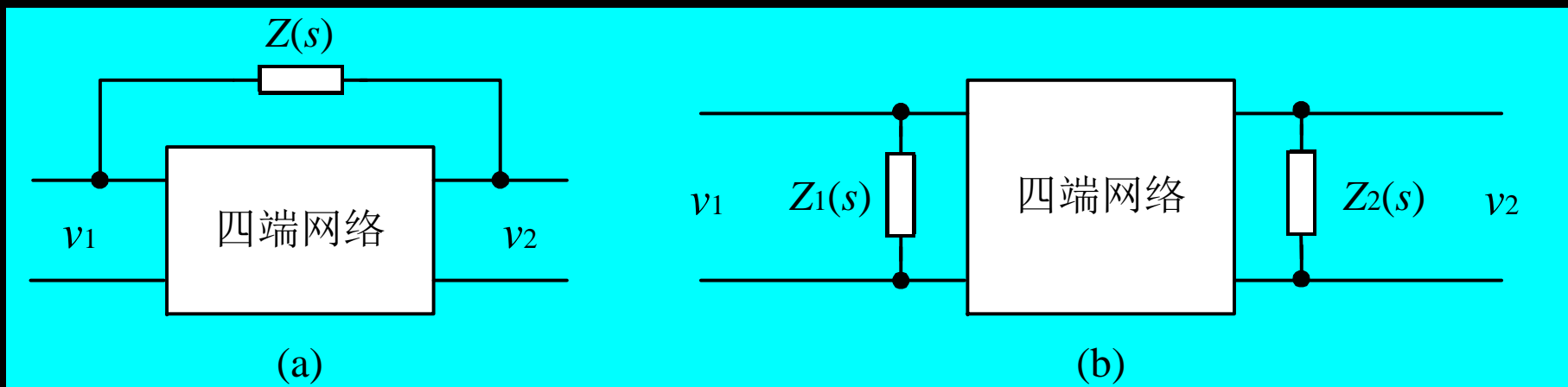


单管放大器的频率特性

- 频率特性包含高频特性与低频特性
- 分析单管放大器的高频特性时，需考虑晶体管的高频等效电路
- 需考虑电路中电抗元件（电容、电感）的频率特性
- 为了简化分析过程，有时用密勒定理对被分析的高频等效电路作单向化近似



密勒定理



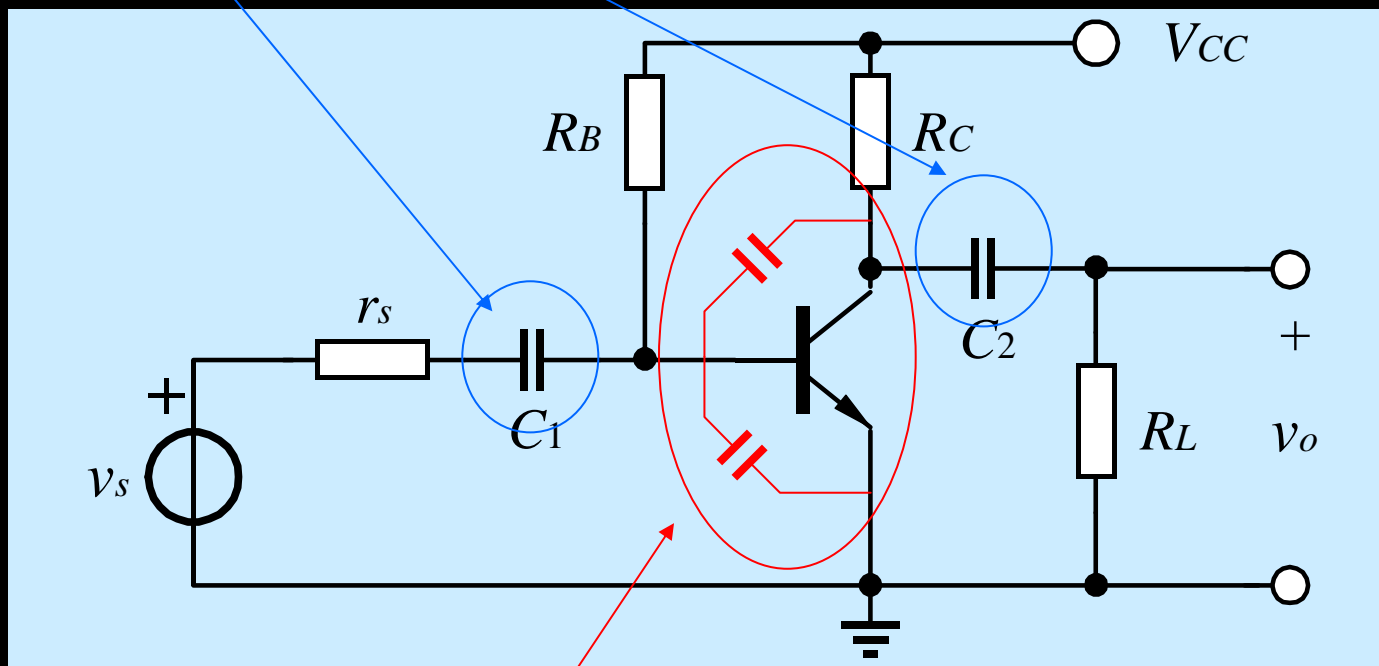
- 将跨接在四端网络两端的阻抗等效到四端网络两侧
- 注意： $A_v(s)$ 包含 $Z(s)$ 的作用

$$Z_1(s) = \frac{Z(s)}{1 - A_v(s)}$$

$$Z_2(s) = \frac{Z(s)}{1 - \frac{1}{A_v(s)}}$$

共射放大器的频率特性分析

耦合电容影响低频特性（在多级放大器中讨论）

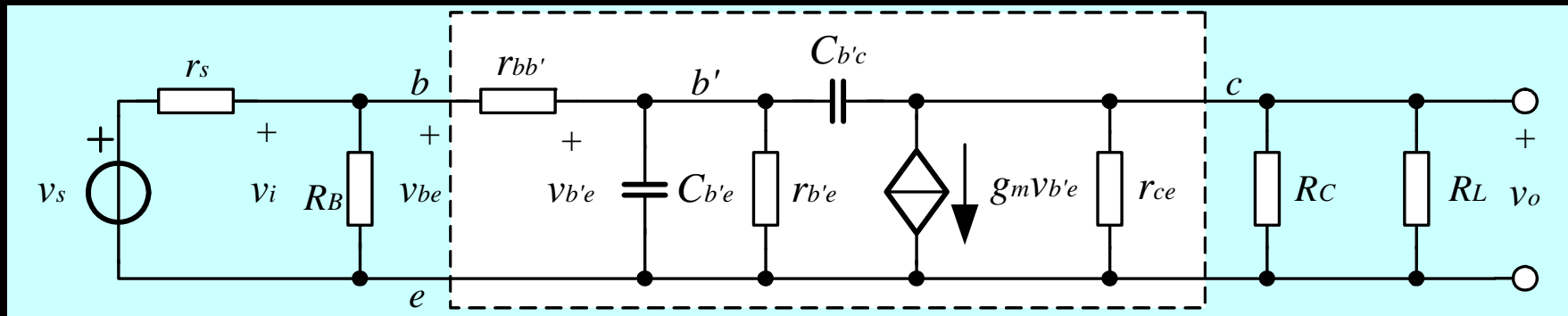


极间电容影响高频特性

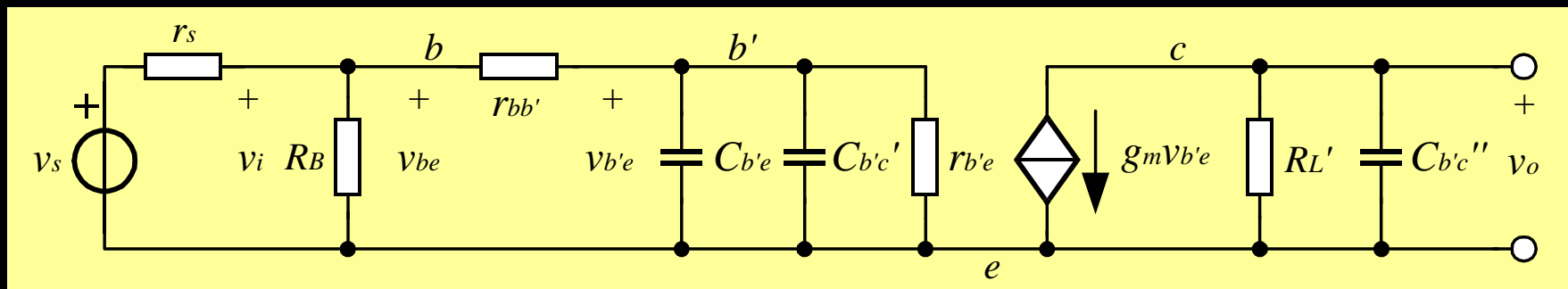


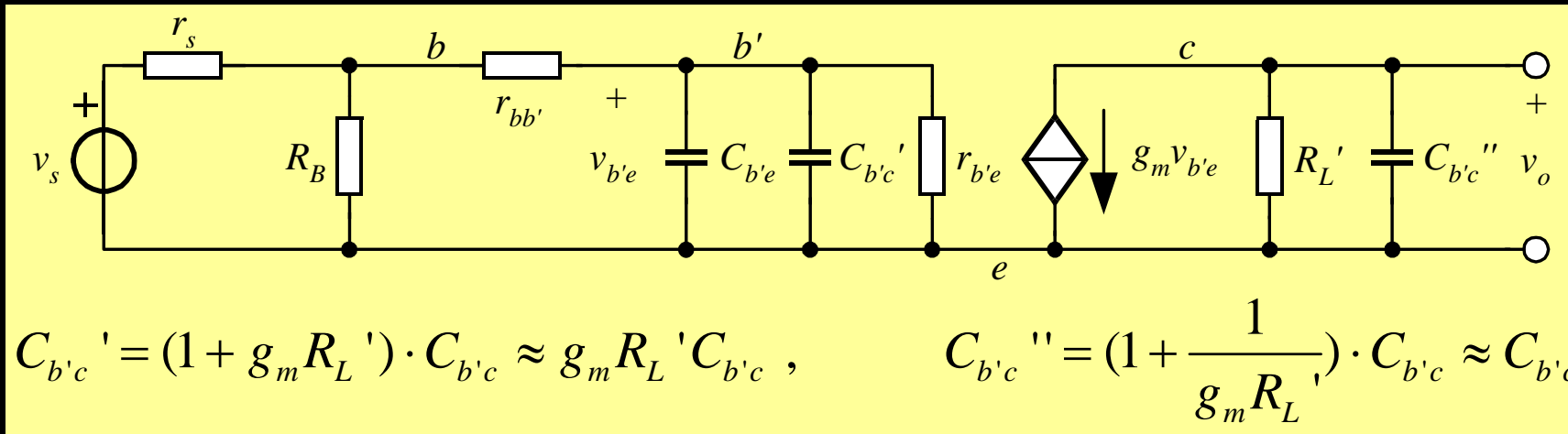
共射放大器的高频小信号等效电路

■ 密勒等效前：

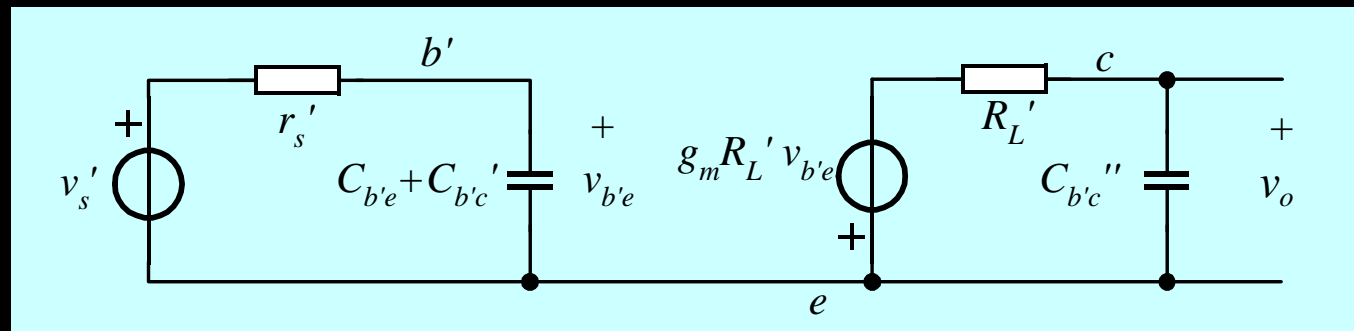


■ 密勒等效后：





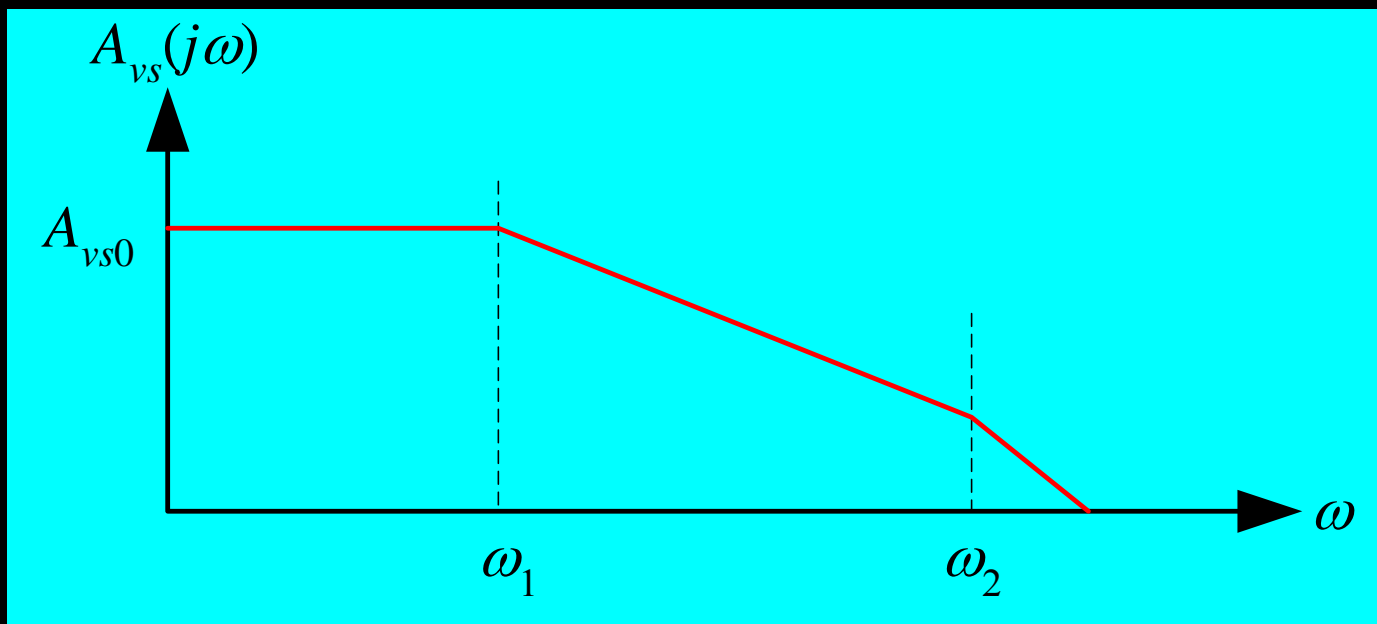
■ 等效电源变换



$$v_s' = \frac{R_B \parallel (r_{bb'} + r_{b'e})}{r_s + R_B \parallel (r_{bb'} + r_{b'e})} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}}, \quad r_s' = r_{b'e} \parallel (r_{bb'} + r_s \parallel R_B)$$

等效电源变换以后可以明显看到电路具有2个极点

共射放大器的频率特性



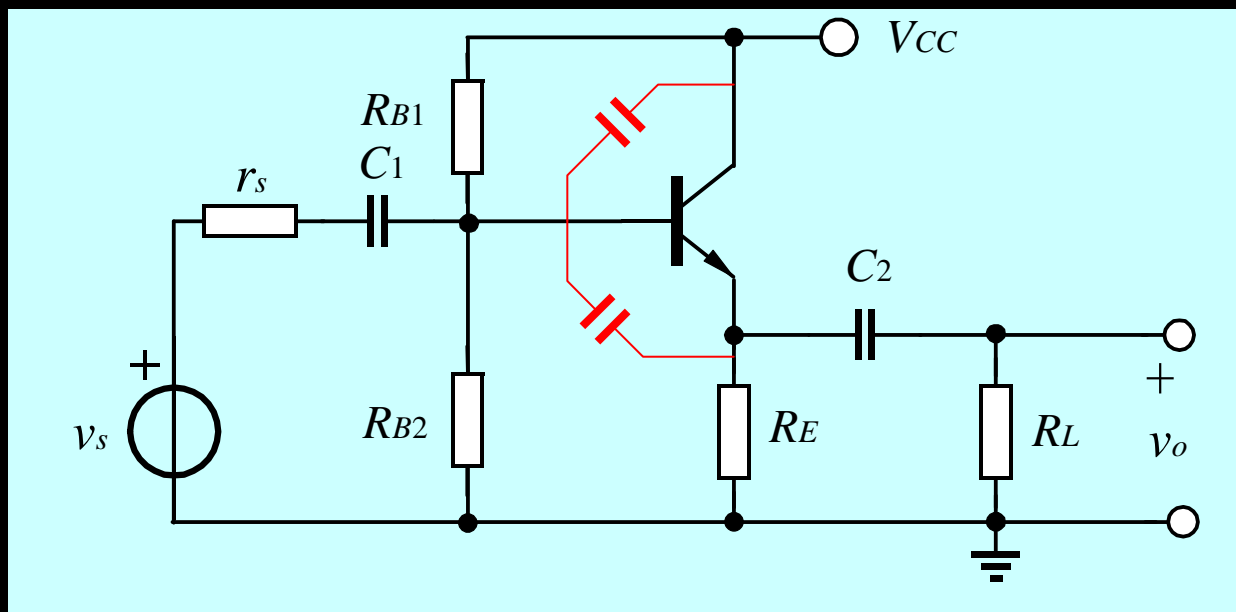
$$\omega_1 = \frac{1}{[(r_s // R_B + r_{bb'}) // r_{b'e}](C_{b'e} + C_{b'c}')$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R'_L C_{b'c}''} \approx \frac{1}{R'_L C_{b'c}}$$

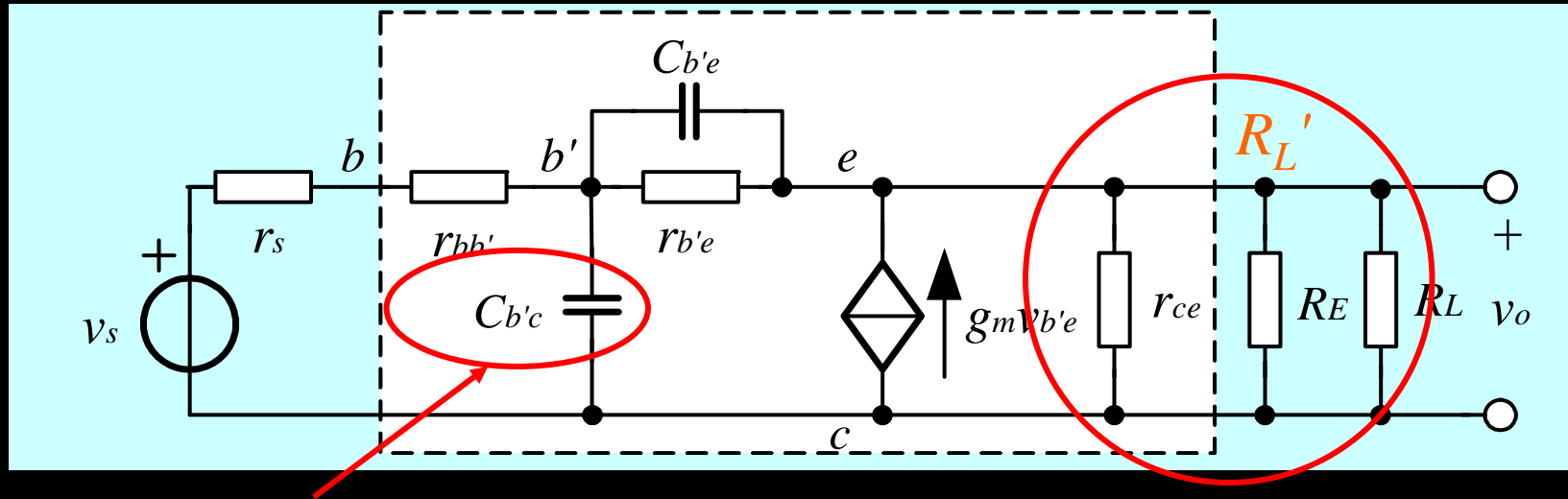
由于密勒效应， $C_{b'c}'$ 变得很大，极点 ω_1 的频率较低（主导极点）

共集放大器的频率特性分析

■ 讨论极间电容的影响



共集放大器的高频等效电路



为了简化电路，忽略此电容，节点电压方程如下：

$$\left[\frac{1}{r_s + r_{bb'}} + j\omega C_{b'e} + \frac{1}{r_{b'e}} \right] v_{b'} - \left(j\omega C_{b'e} + \frac{1}{r_{b'e}} \right) v_o = \frac{v_s}{r_s + r_{bb'}}$$

$$\left(\frac{1}{R_L'} + j\omega C_{b'e} + \frac{1}{r_{b'e}} \right) v_o - \left(j\omega C_{b'e} + \frac{1}{r_{b'e}} \right) v_{b'} = g_m (v_{b'} - v_o)$$



共集放大器的频率特性

由节点电压方程解得：

低频增益

$$A_{v_s}(j\omega) = \frac{v_o}{v_s} = \frac{(1 + \beta)R_L'}{r_s + r_{bb'} + r_{b'e} + (1 + \beta)R_L'} \cdot \frac{1 + j\frac{\omega}{\omega_z}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_p}}$$

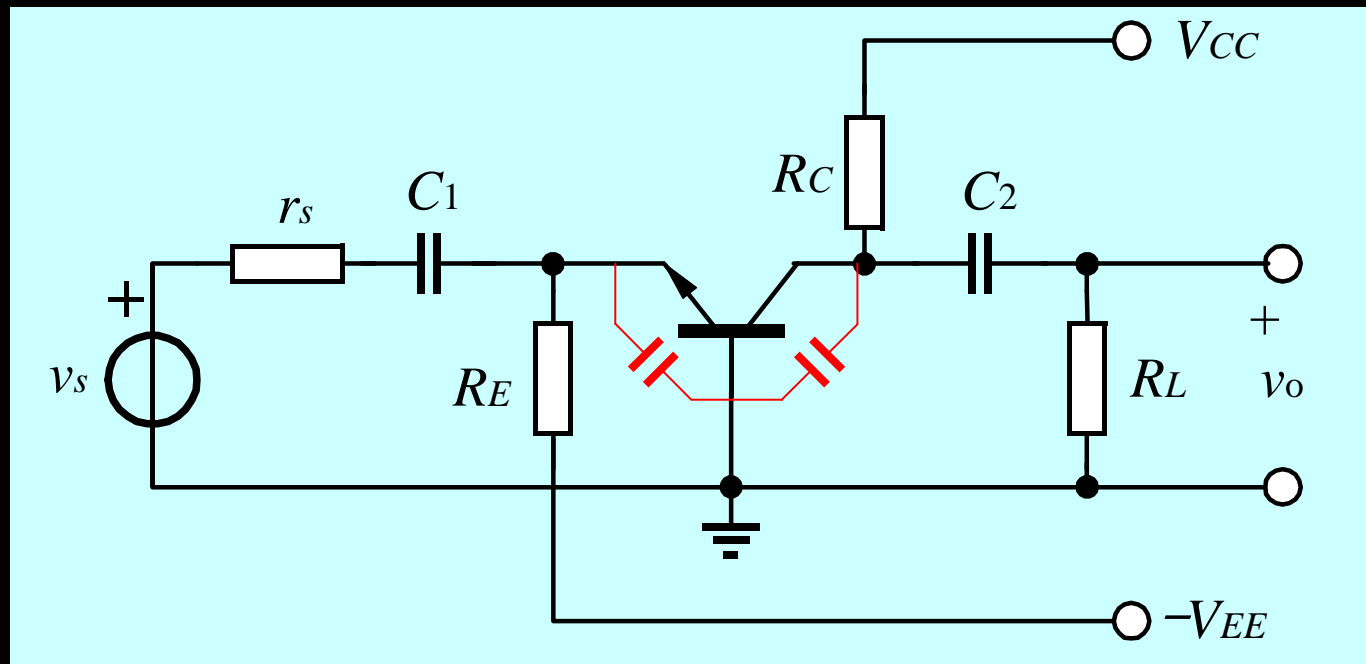
$$\omega_z = \frac{1 + \beta}{r_{b'e} C_{b'e}}$$

$$\omega_p = \frac{r_s + r_{bb'} + r_{b'e} + (1 + \beta)R_L'}{(r_s + r_{bb'} + R_L')} \cdot \frac{1}{r_{b'e} C_{b'e}}$$

- 特点：
1. 无密勒效应，零点与极点的频率都很高，接近特征频率
 2. 极点与零点频率比较接近，具有互补作用

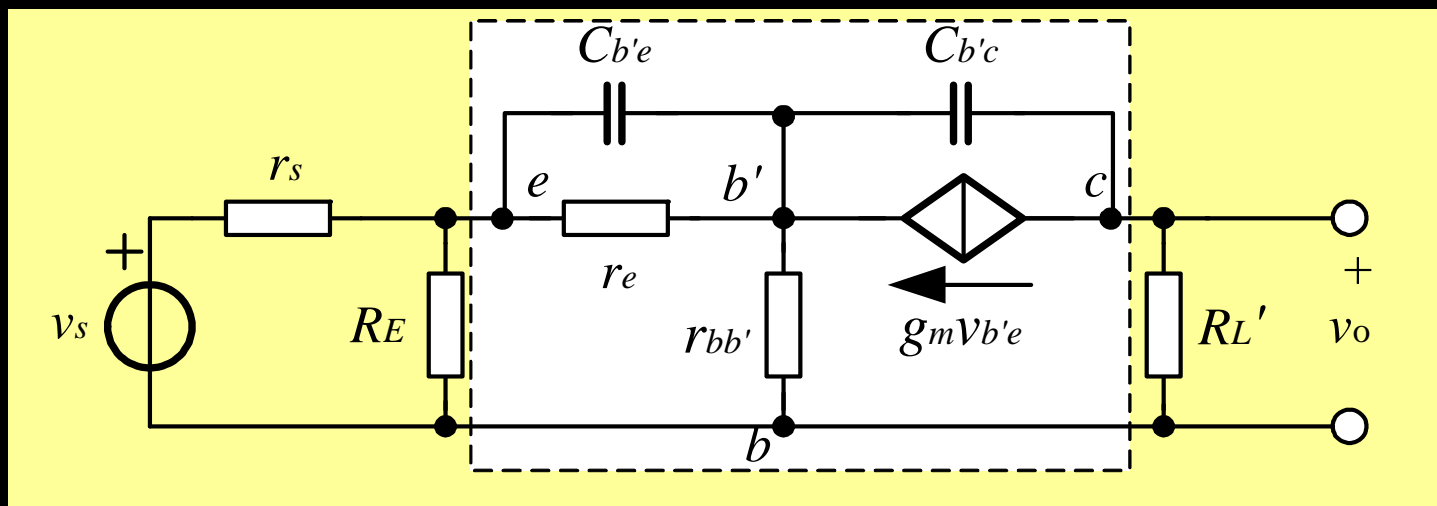
共基放大器的频率特性分析

■ 讨论晶体管极间电容的影响

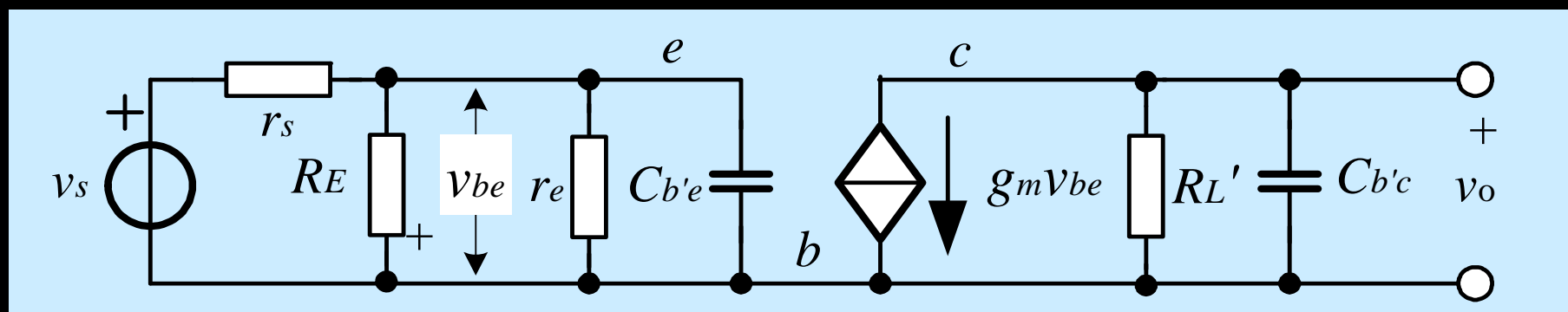




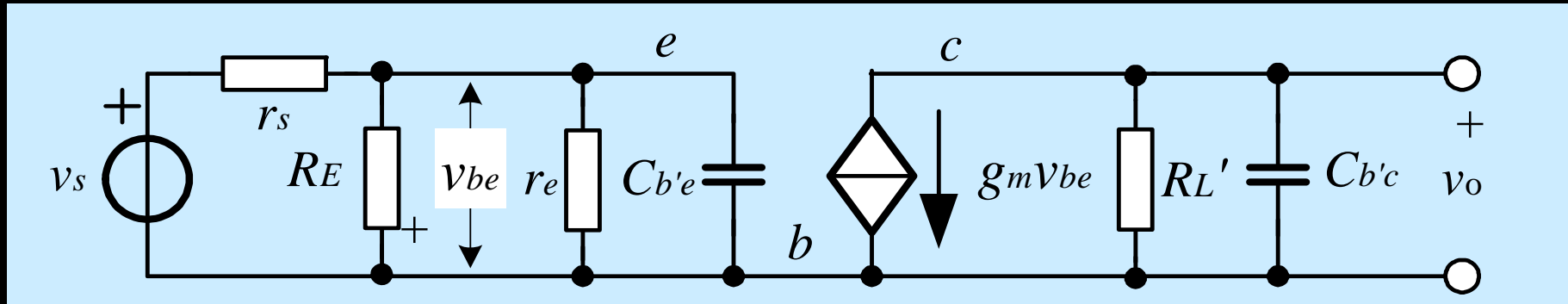
共基放大器的高频等效电路



- 忽略基区电阻 $r_{bb'}$ 后的简化电路



共基放大器的频率特性



两个极点:

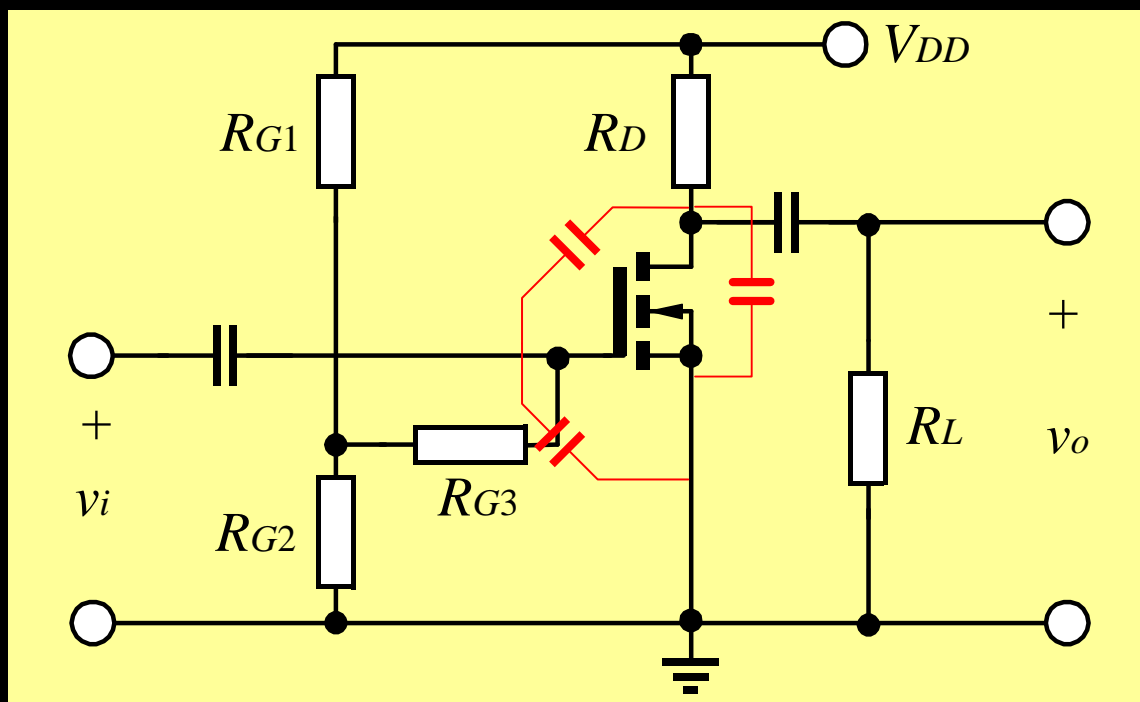
$$\omega_1 = \frac{1}{(r_s // R_E // r_e) C_{b'e}}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R_L' C_{b'c}}$$

特点：由于不存在密勒效应，两个电容都较小，另外发射结电阻 r_e 也远小于共射放大器的 r_{be} ，所以两个极点的频率都比较高

共源放大器的频率特性分析

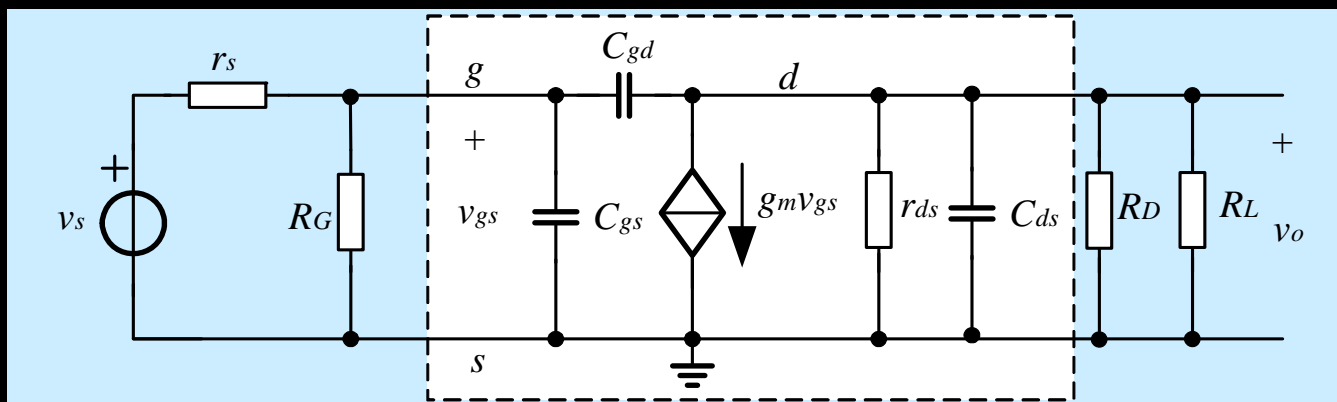
- 只讨论晶体管极间电容影响



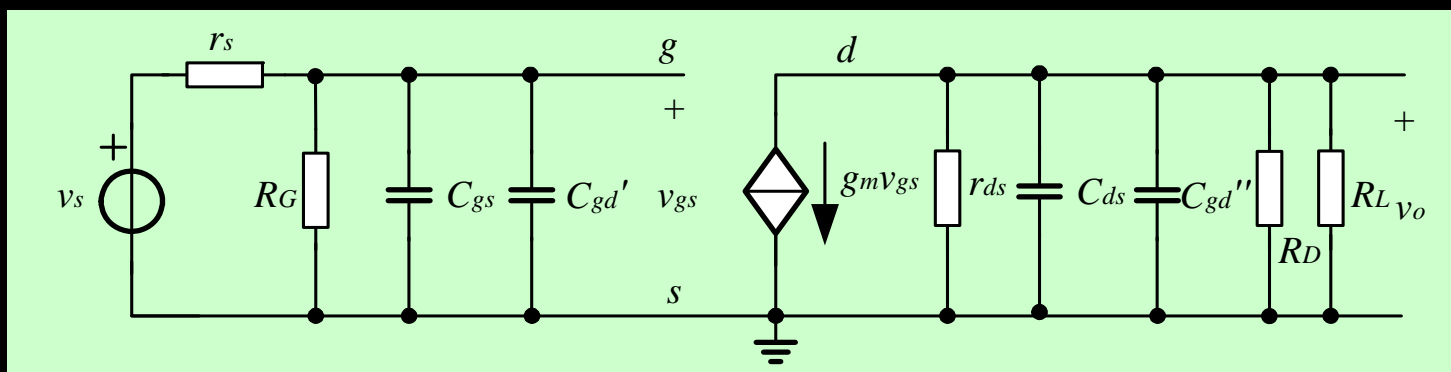


共源放大器的高频等效电路

■ 密勒等效前



■ 密勒等效后





共源放大器的频率特性

- 存在两个极点

$$\tau_1 = r_s' (C_{gs} + C_{gd}')$$

$$\tau_2 = R_L' (C_{ds} + C_{gd}'')$$

其中

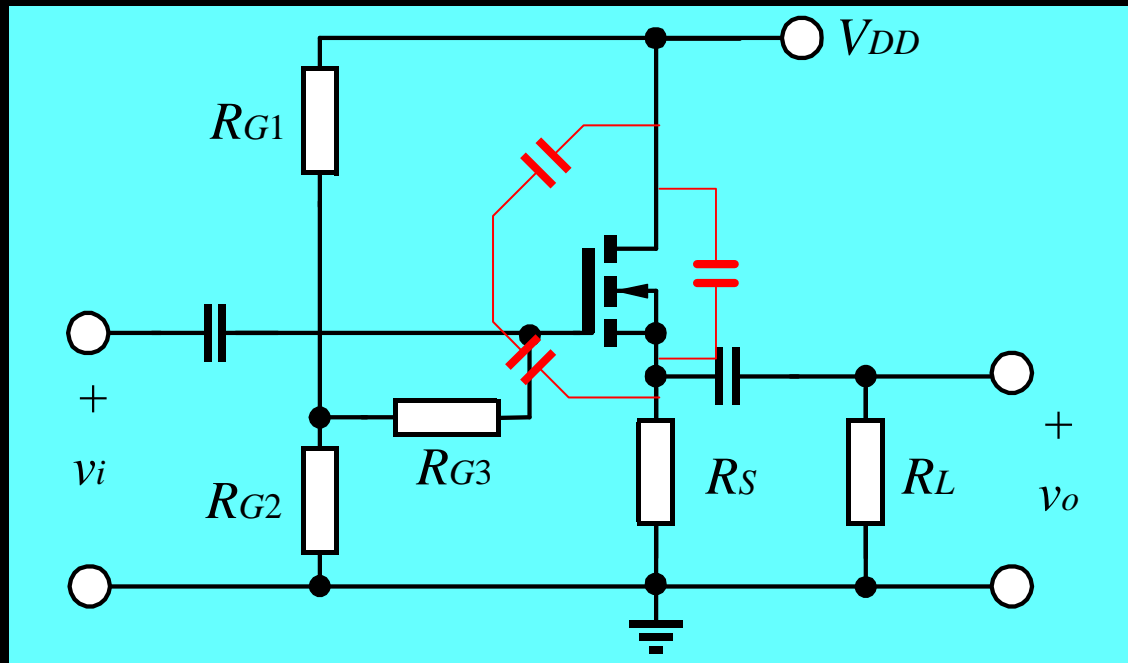
$$r_s' = r_s // R_G$$

$$R_L' = R_L // R_D // r_{ds}$$

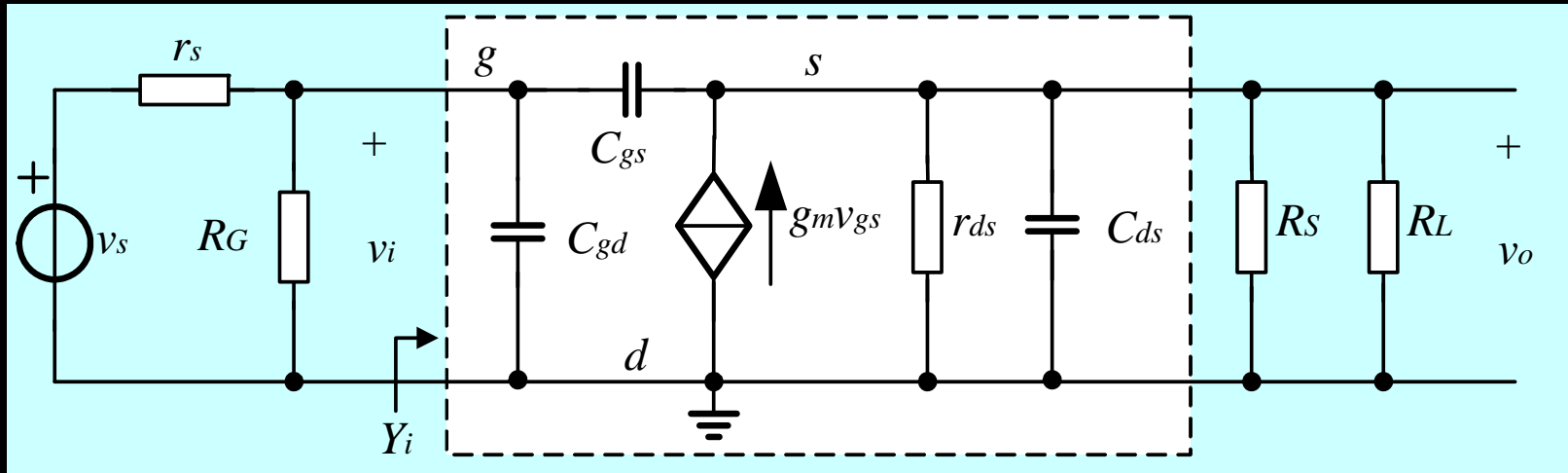
- 由于密勒效应， C_{gd}' 比较大，第一个极点是主导极点
- 由于FET放大器的 g_m 较小，密勒效应不如BJT放大器显著
- 高频响应较差

共漏放大器的频率特性分析

- 只讨论晶体管极间电容影响



共漏放大器的高频等效电路



- 源电压增益：采用戴文宁等效

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{(g_m + j\omega C_{gs})R_L'}{1 + [g_m + j\omega(C_{gs} + C_{ds})]R_L'}$$

$$Y_i = j\omega C_{gd} + (1 - A_v) \cdot j\omega C_{gs} \approx j\omega C_{gd}$$

$$A_{vs} = \frac{R_G}{r_s + R_G} \cdot \frac{1}{1 + j\omega(r_s // R_G)C_{gd}} \cdot \frac{(g_m + j\omega C_{gs})R_L'}{1 + [g_m + j\omega(C_{gs} + C_{ds})]R_L'}$$



共漏放大器的频率特性

$$A_{vs} = \frac{R_G}{r_s + R_G} \cdot \frac{g_m R_L'}{1 + g_m R_L'} \cdot \frac{1 + j\omega\tau_z}{(1 + j\omega\tau_{p1})(1 + j\omega\tau_{p2})}$$

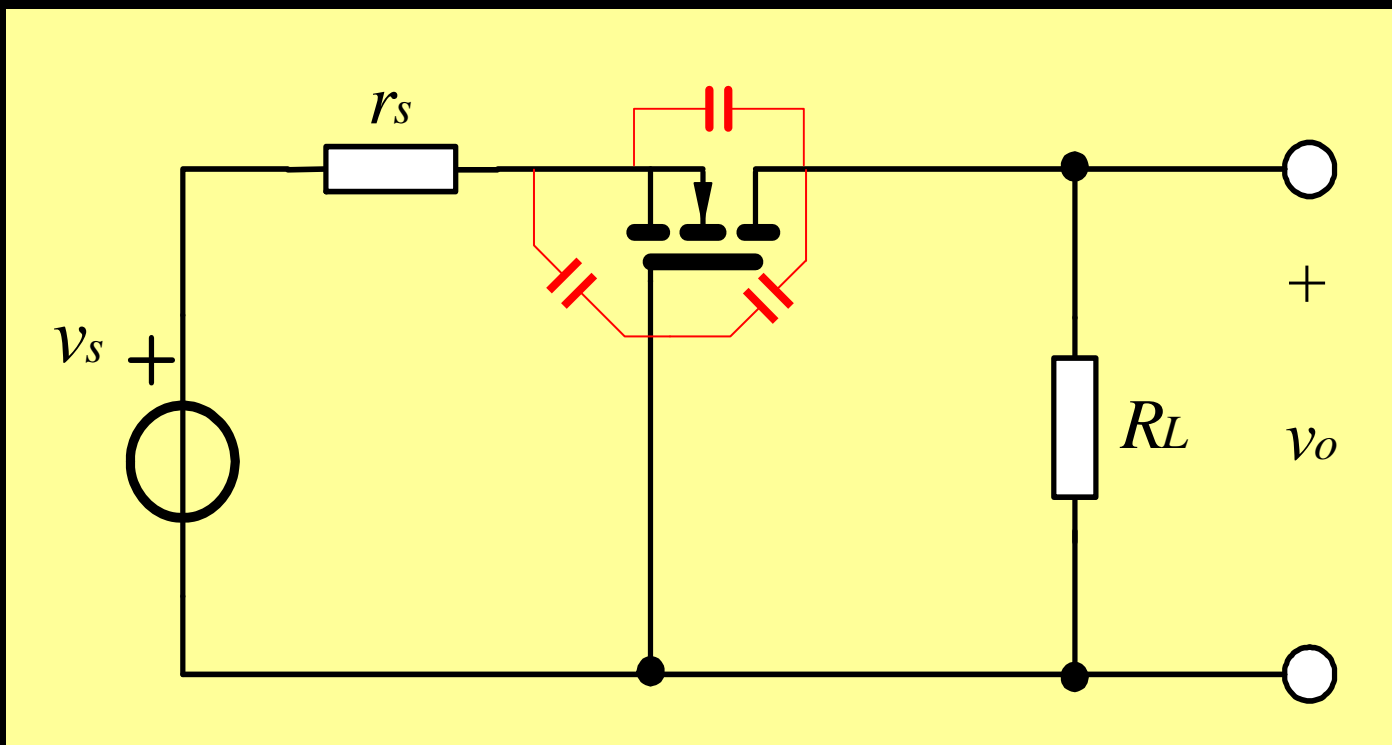
- 1个零点、2个极点：

$$\tau_z = \frac{C_{ds}}{g_m}, \quad \tau_{p1} = (r_s // R_G)C_{gd}, \quad \tau_{p2} = \frac{C_{gs} + C_{ds}}{g_m}$$

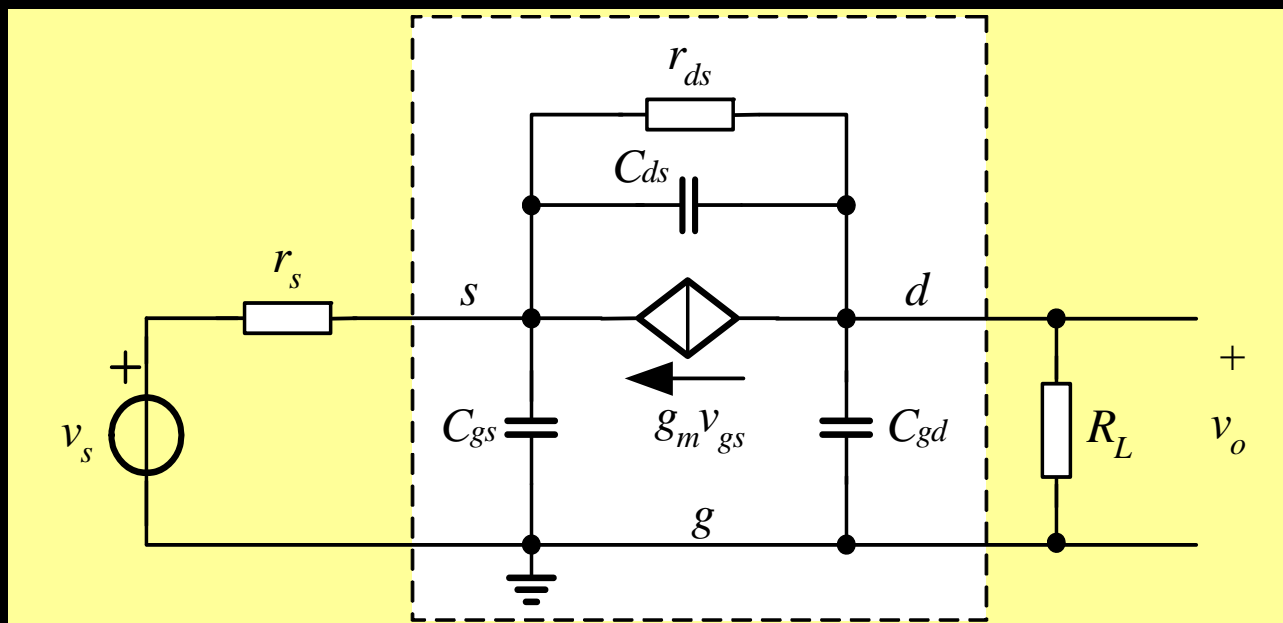
- 无密勒效应，输入电容较小
- 高频响应优于共源放大器

共栅放大器的频率特性分析

- 只讨论晶体管极间电容影响



共栅放大器的高频等效电路



- 忽略电阻 r_{ds} 和电容 C_{ds}
 - 无密勒效应，两个极点
 - 共栅放大器的 τ_{p1} 远小于共源放大的极点 τ_1
- $$\tau_{p1} = (r_s // \frac{1}{g_m}) C_{gs}, \quad \tau_{p2} = C_{ds} R_L$$



BJT放大器与FET放大器的比较

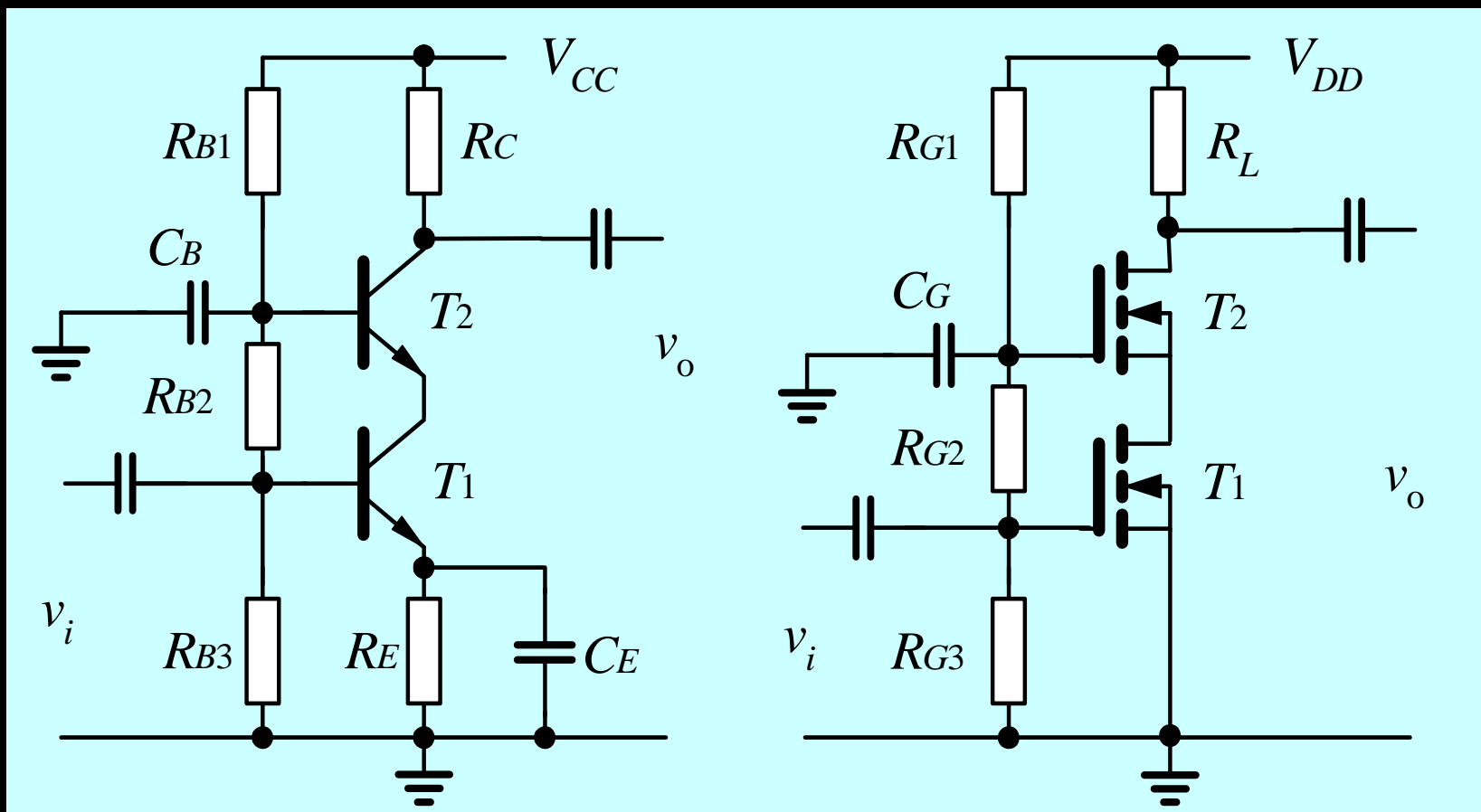
	共射电路	共集电路	共基电路	共源电路	共漏电路	共栅电路
电压放大	高	≈ 1	高	较高	< 1	较高
电流放大	高	高	≈ 1	—	—	—
输入电阻	中等	高	低	极高	极高	低
输出电阻	高	低	很高	高	中	极高
高频特性	差	好	好	差	好	好



双管组合放大器

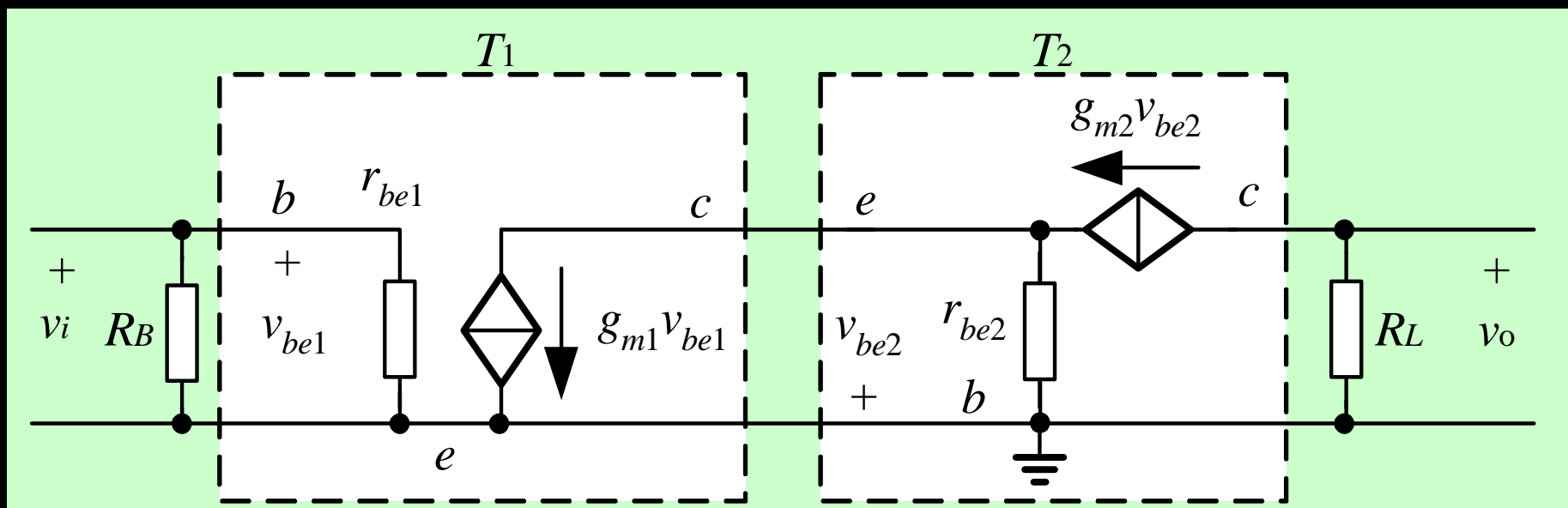
- 双管组合放大器的特点：
 - 发挥基本放大器的优点，避免其缺点
- 双管组合电路的基本形式：
 - 共射-共基电路和共源-共栅电路
 - 共集-共集电路
 - 共集-共射电路
 - 共集-共基电路
 - 复合管

共射—共基电路和共源—共栅电路





共射-共基电路的小信号等效电路



- 忽略电阻 r_{ce}
- 电压增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_{m1} R_L \frac{g_{m2} r_{be2}}{1 + g_{m2} r_{be2}} \approx -g_{m1} R_L$$

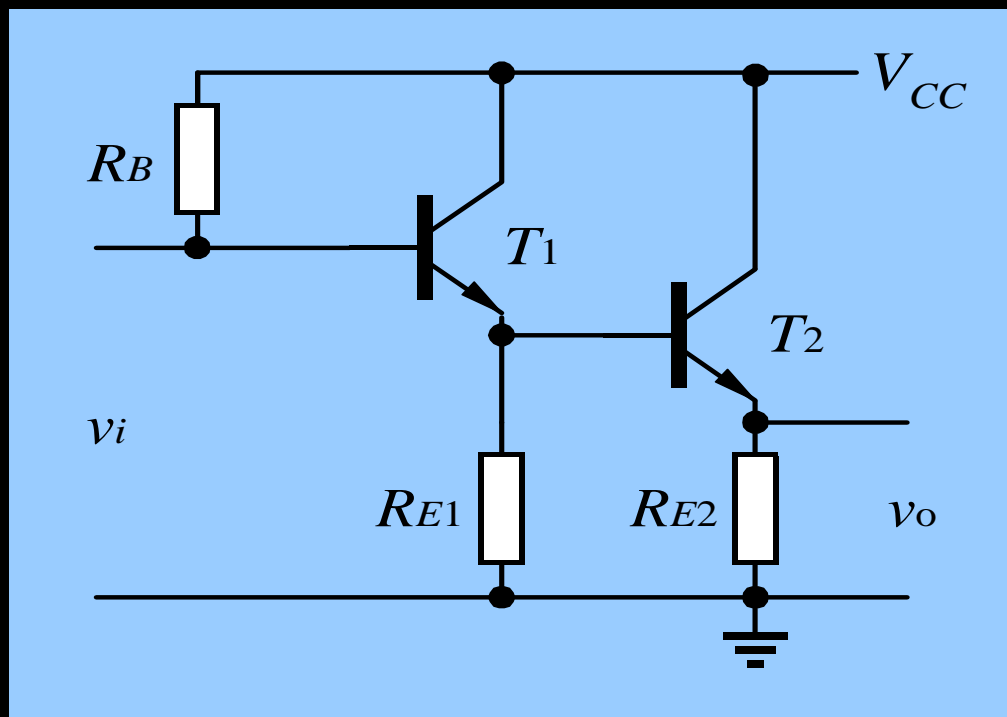


共射—共基电路的特点

- 电压增益与单管共射放大器相同
- 输入电阻单管共射放大器相同
- 输出电阻与单管共基放大器相同，是单管共射放大器的 $(1+\beta)$ 倍
- 第一级共射电路增益为1，消除了密勒效应，使得高频特性比单管共射放大器好得多

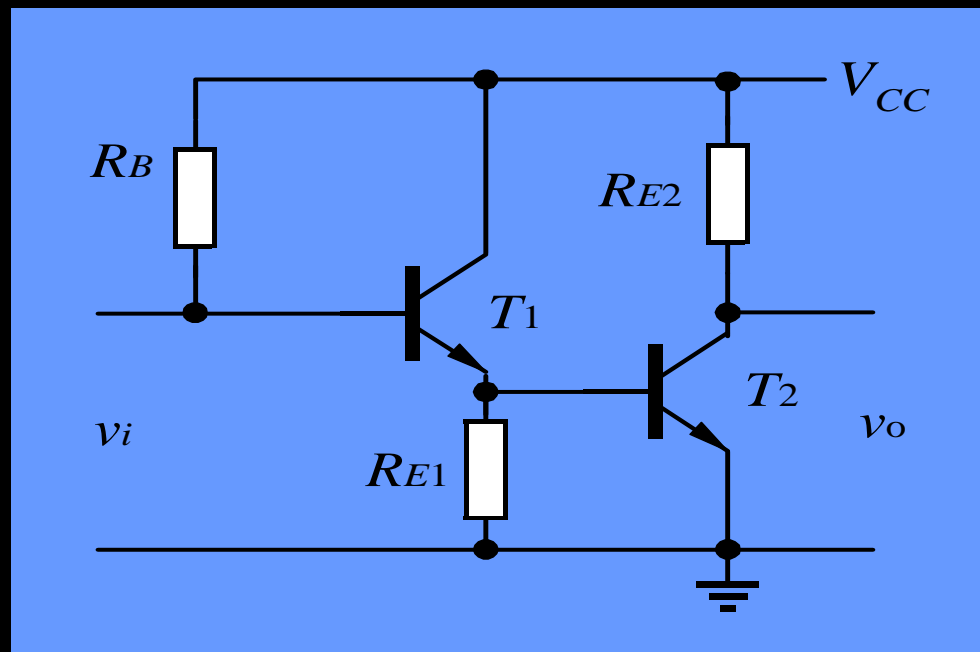
共集—共集电路

- 高输入电阻
- 低输出电阻
- 电压增益近似等于1

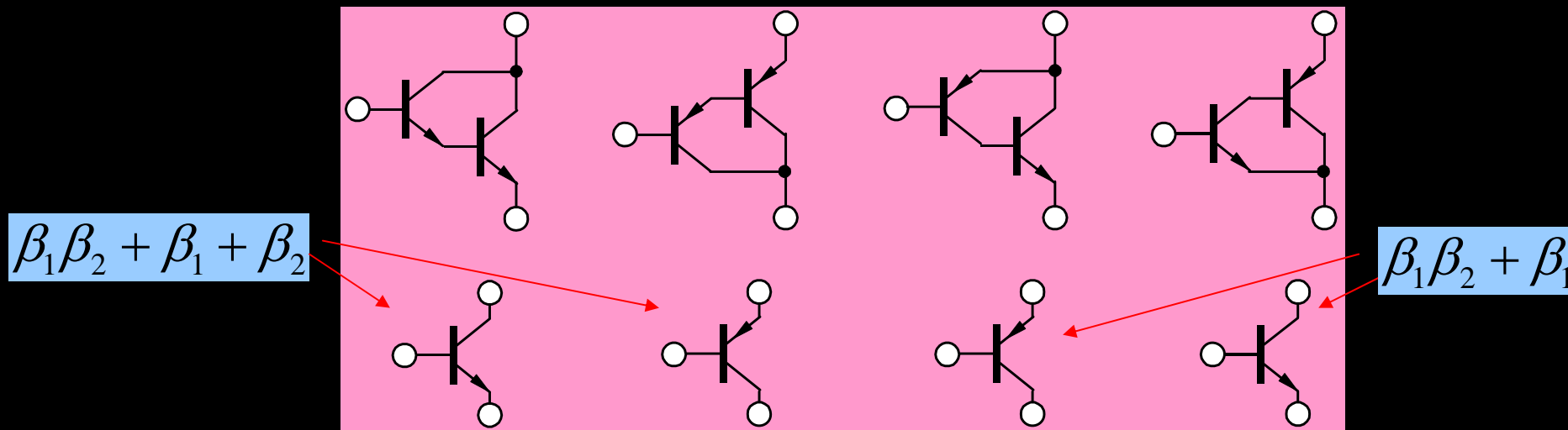


共集—共射电路

- 电压增益近似与共射电路相同
- 高输入电阻
- 部分改善共射电路的高频特性



复合晶体管



- 极性取决于第一个晶体管
- 不同的复合方式有不同的特性参数
- 共同的参数特点是： β 很大



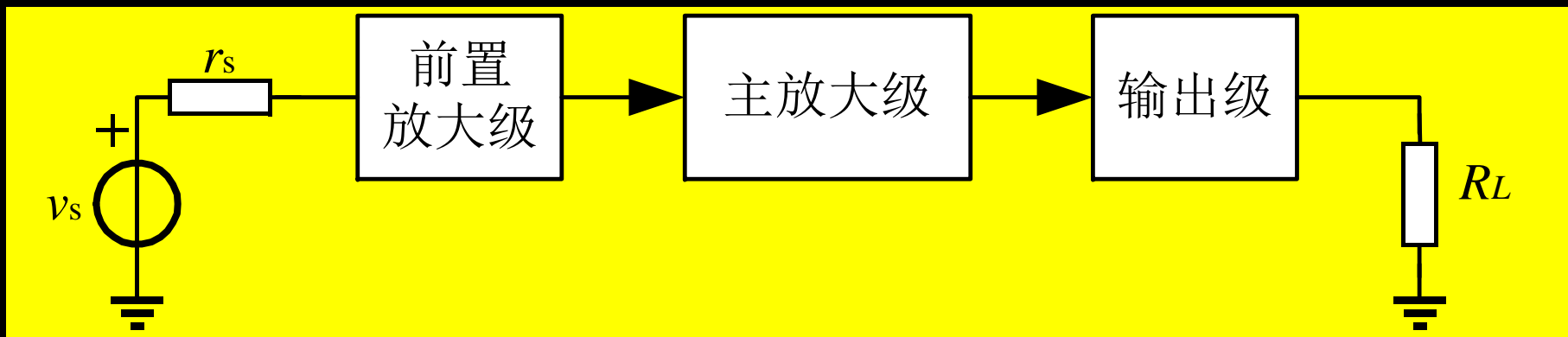
多级放大器

多级放大器的结构

多级放大器的小信号放大特性

多级放大器的频率特性

多级放大器的结构



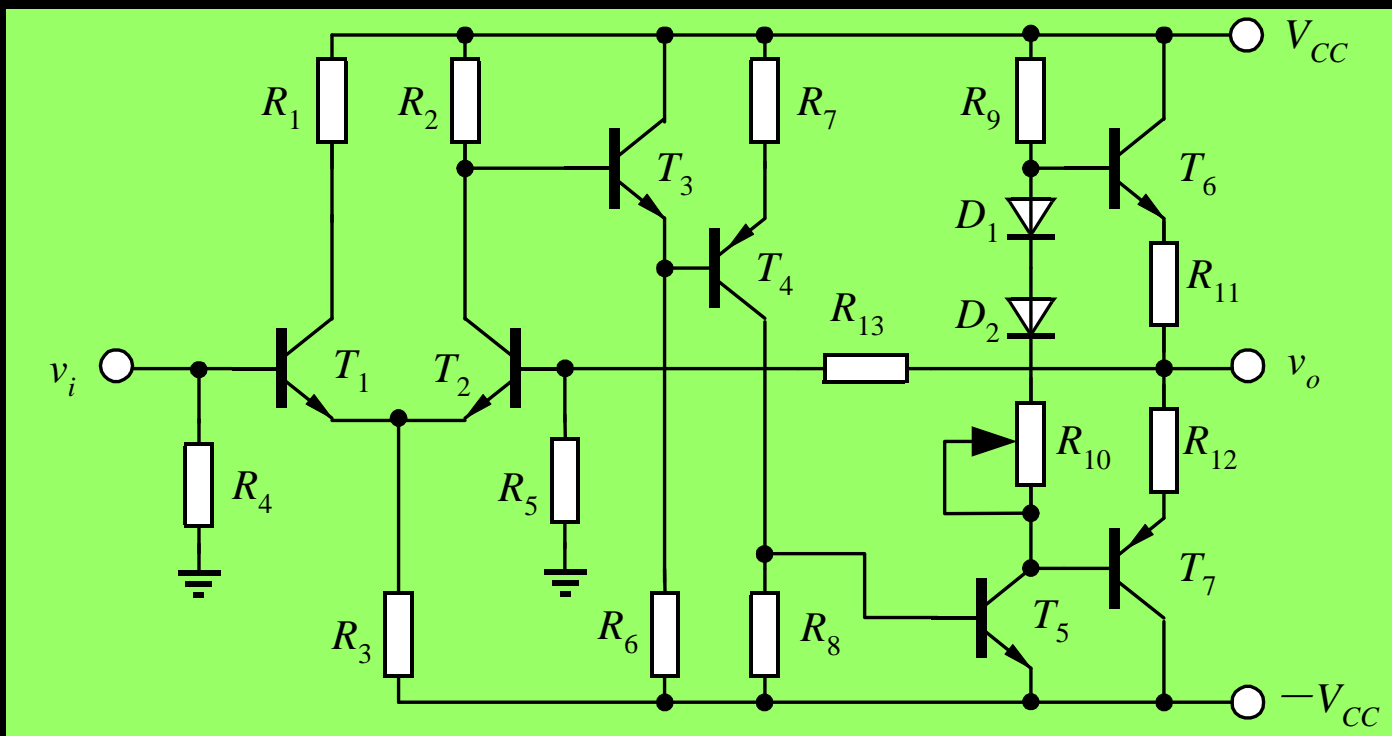
- 前置放大级：与信号源的耦合，低噪声
- 主放大级：完成放大器的主要特性指标
- 输出级：与负载的耦合，功率输出



多级放大器的级间耦合方式

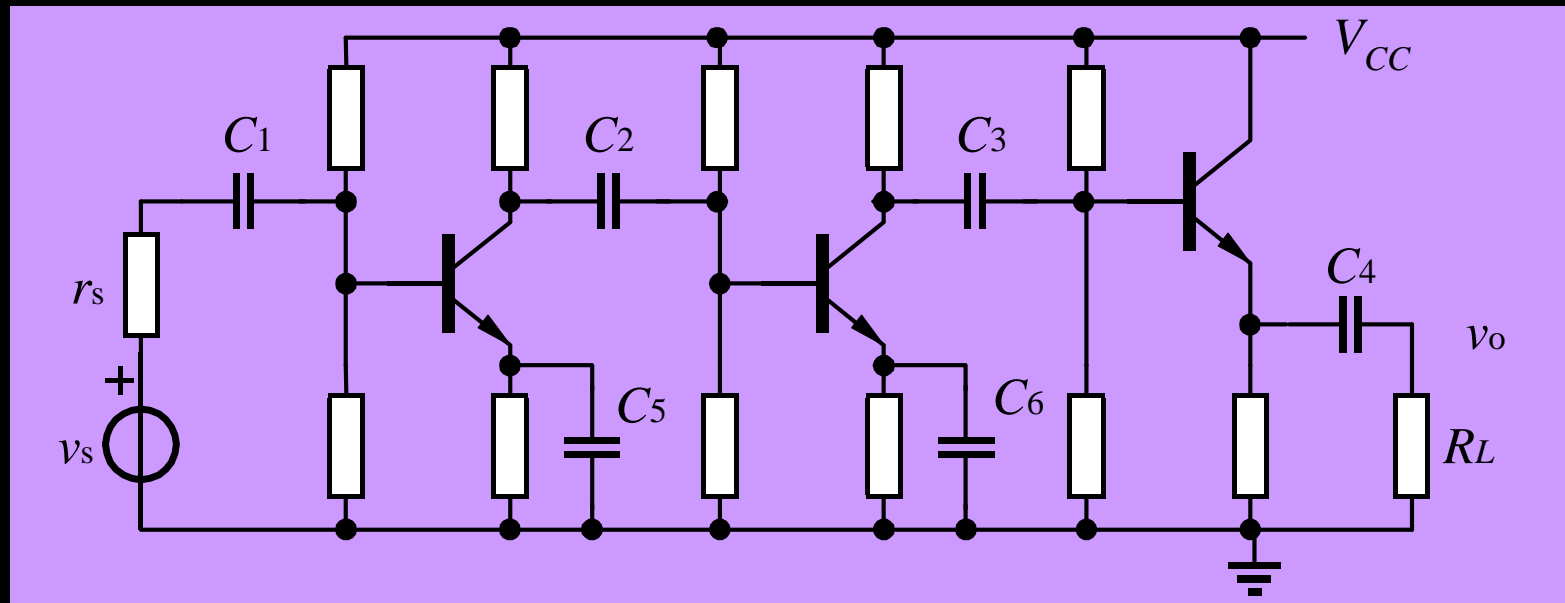
- 直接耦合
- 阻容耦合
- 变压器耦合

直接耦合放大器



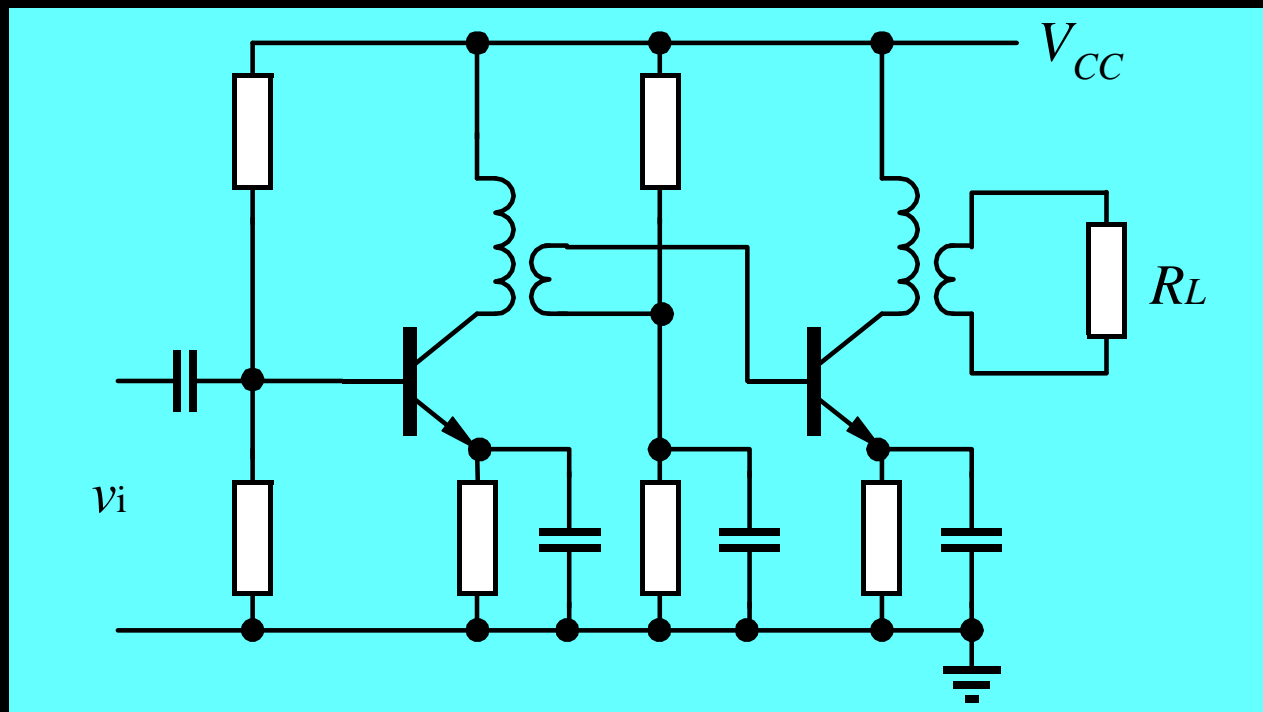
- 电路简单，能够放大直流信号，称为直流放大器
- 比较严重的问题是静态工作点的偏离和放大器的漂移
- 在集成放大器中采用

阻容耦合放大器



- 耦合电容： C_1, C_2, C_3, C_4 ，旁路电容： C_5, C_6
- 静态工作点相互独立，静态工作点相互独立，不存在漂移问题，
- 但是无法放大很低频率的信号

变压器耦合放大器



- 静态工作点相互独立，不存在漂移问题
- 无法放大很低频率和很高频率的信号
- 阻抗变换，功率传输，电气上隔离

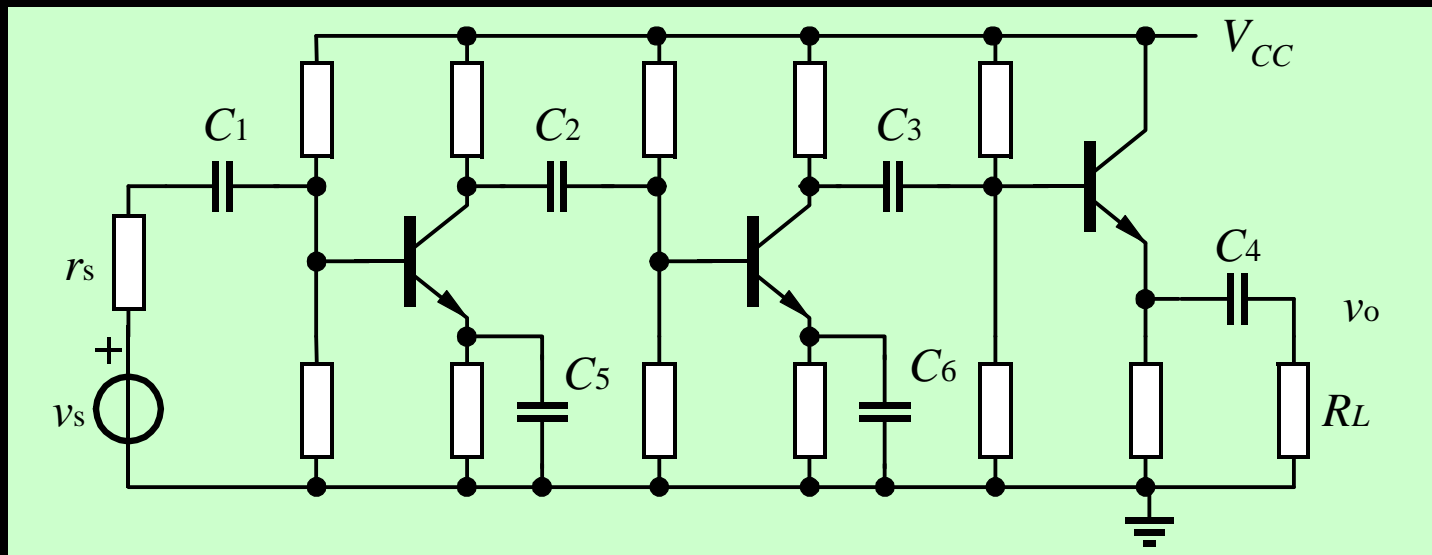


多级放大器的交流小信号放大特性

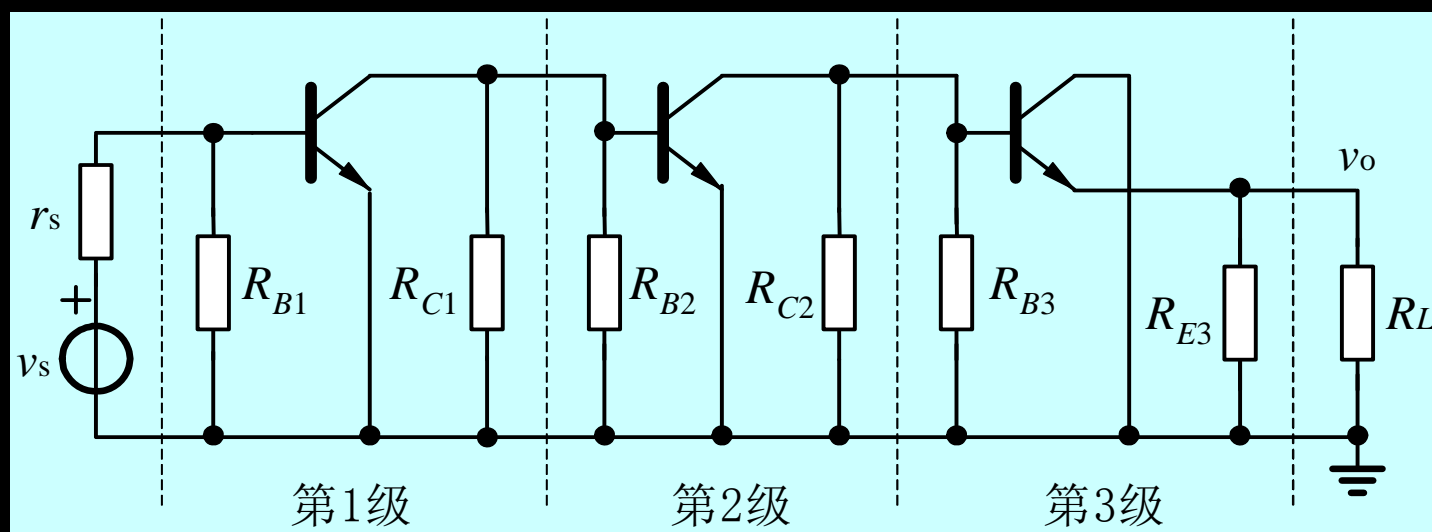
- 总增益等于各级增益之积
 - 计算各级增益时要注意将后级的输入阻抗作为前级放大器的负载阻抗
- 总输入阻抗等于首级放大器的输入阻抗
- 总输出阻抗等于末级放大器的输出阻抗



多级阻容耦合放大器分析

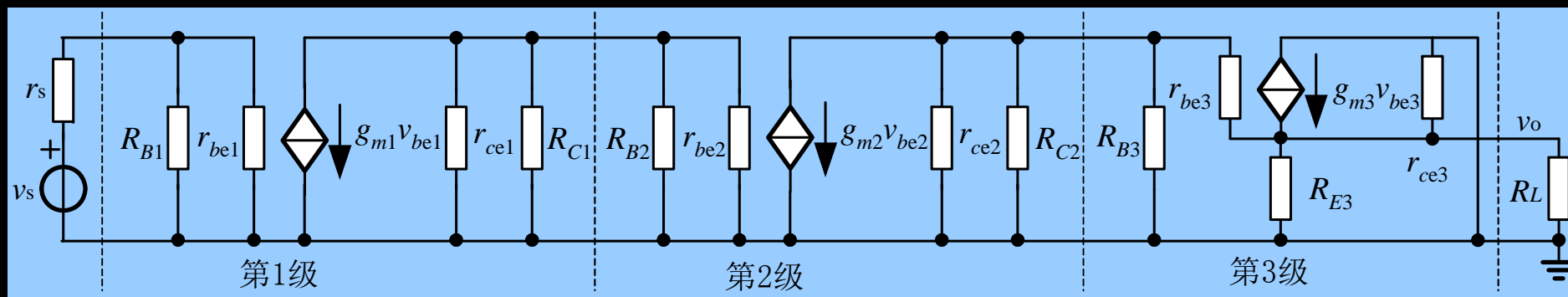


交流回路





多级放大器的交流小信号等效电路



- 后一级的输入电阻是前一级的负载
- 计算每级的增益时，后级的输入阻抗计入该级的负载

$$R_{Lm} = R_{om} // R_{i(m+1)}$$



多级放大器的频率响应

■ 频率响应

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \cdot \dots \cdot \dot{A}_{vn} = \prod_{i=1}^n \dot{A}_{vi}$$

■ 幅频特性

$$|\dot{A}_v| = \prod_{i=1}^n |\dot{A}_{vi}|$$

■ 相频特性

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i$$



多级放大器的频率特性

- 多级放大器的总带宽总是小于各级的带宽

$$f_L \approx \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \dots + f_{Ln}^2}$$

$$f_H \approx \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{Hn}^2}}}$$

- 若存在某级的下截止频率远远高于其他级的下截止频率，某级的上截止频率远远低于其他级的上截止频率的情况下，多级放大器的频率响应主要就由这两个频率确定。

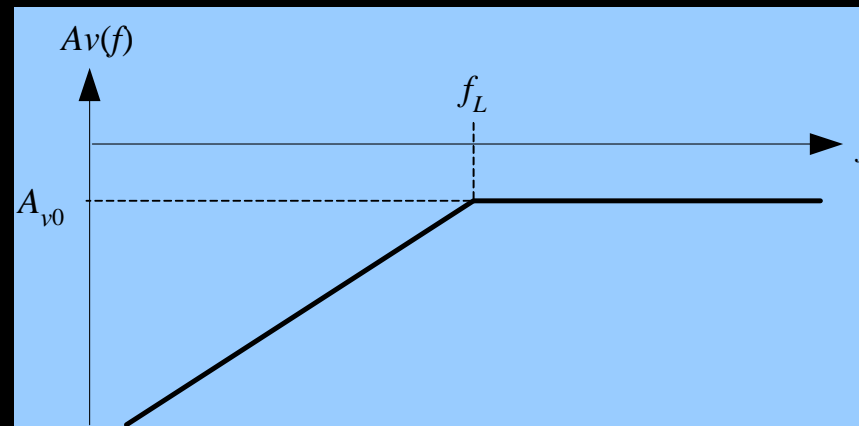
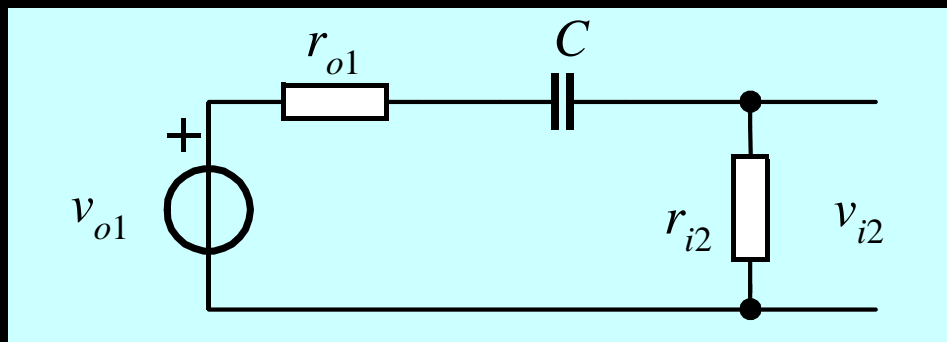


直接耦合放大器的频率特性

- 下限频率为0（直流放大）
- 上限频率由各级放大器的高频特性（晶体管）确定

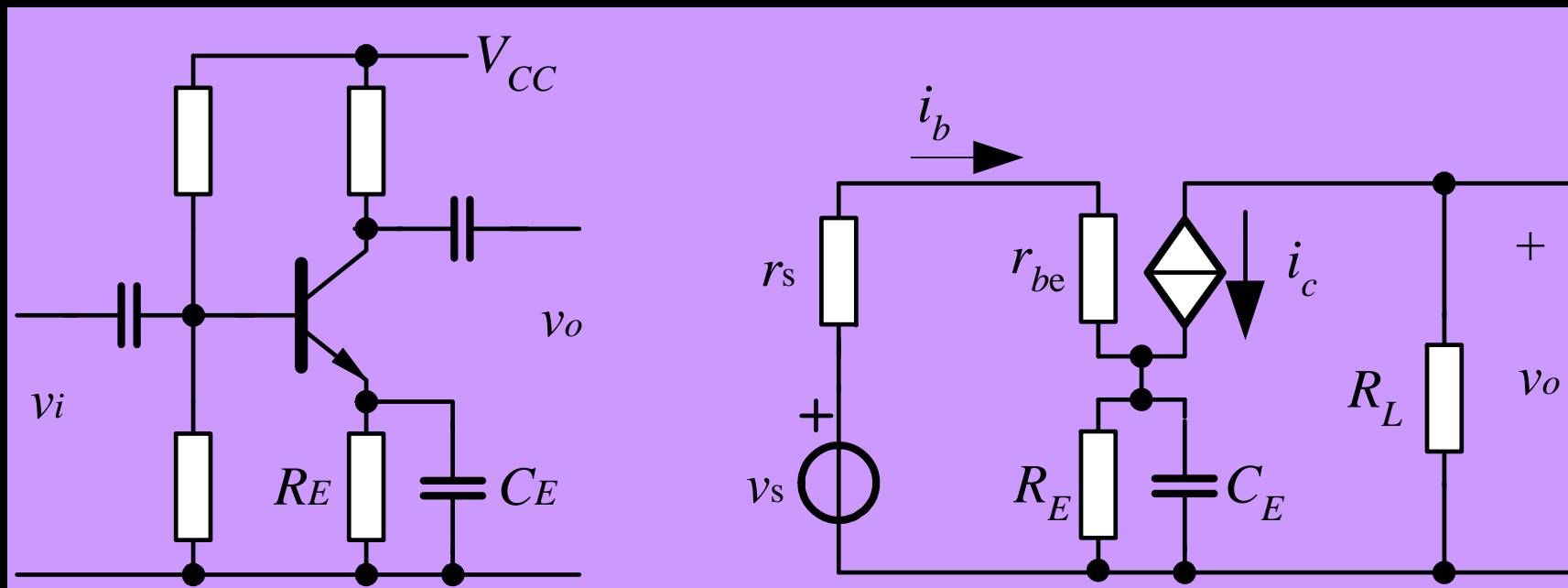
阻容耦合放大器的频率特性

- 高频特性由各级放大器的高频特性确定
(由晶体管确定)
- 低频特性由耦合电路确定



$$f_L = \frac{1}{2\pi(r_{o1} + r_{i2})C}$$

带射极旁路电容的共射放大器



■ 全电压增益

$$A_{v_s}(j\omega) = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{\beta R_L}{r_s + r_{be} + (1 + \beta)R_E} \cdot \frac{1 + j\omega R_E C_E}{1 + j\omega \frac{(r_s + r_{be})R_E C_E}{r_s + r_{be} + (1 + \beta)R_E}}$$



射极旁路电容的低频特性

- 当 $(r_s + r_{be}) \ll (1 + \beta)R_E$ 时,

$$A_{vs}(j\omega) \approx -\frac{R_L}{R_E} \cdot \frac{1 + j\omega R_E C_E}{1 + j\omega \frac{(r_s + r_{be})C_E}{1 + \beta}}$$

- 一个零点 f_z , 一个极点 f_p

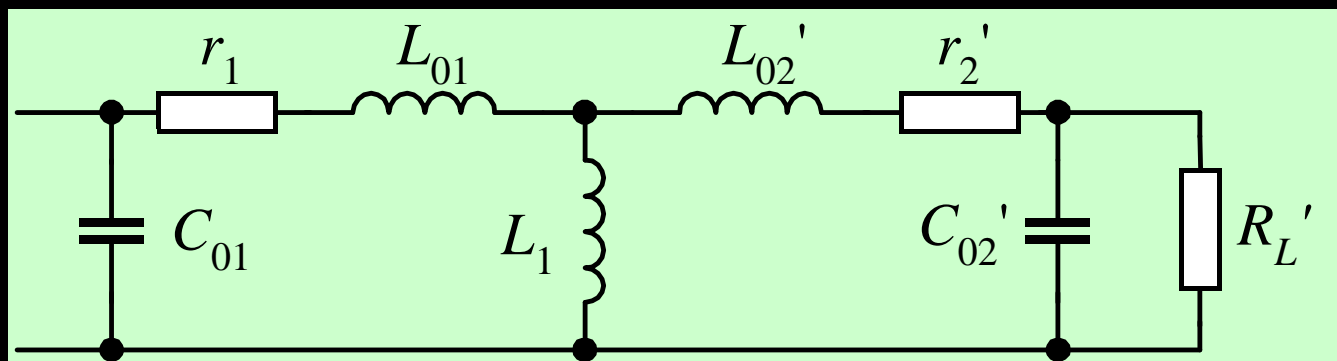
$$f_z = \frac{1}{2\pi R_E C_E}$$

$$f_p = \frac{1 + \beta}{2\pi (r_s + r_{be}) C_E}$$

- 射极旁路电容确定下截止频率将比由输入耦合电容确定的频率高 β 倍

变压器耦合放大器的频率特性

- 高频特性和低频特性一般均由变压器确定
- 变压器的小信号等效模型



- 下截止频率由 L_1 确定
- 上截止频率由 C_{01} 、 C_{02}' 、 L_{01} 、 L_{02}' 等确定



复旦大学微电子学系 唐长文

第3章结束

