

第二章 放大电路的基本原理

- 2.1 放大的概念
- 2.2 放大电路的主要技术指标
- 2.3 单管共发射极放大电路
- 2.4 放大电路的基本分析方法
- 2.5 静态工作点的稳定问题
- 2.6 放大电路的三种基本组态
- 2.8 多级放大电路

2.5 静态工作点的稳定问题

2.5.1 静态工作点稳定的必要性

一. 必要性

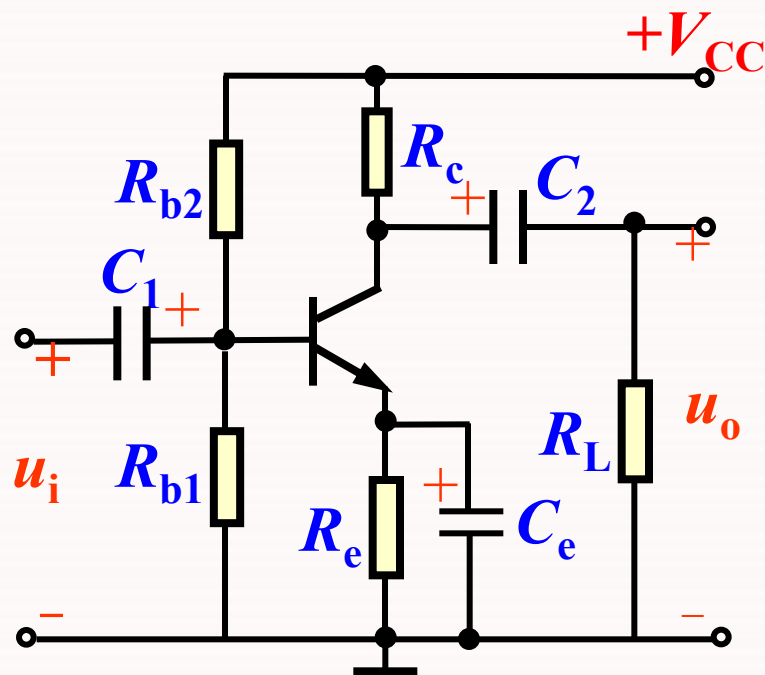
- 静态工作点决定放大电路是否产生失真；
- 静态工作点影响电压放大倍数、输入电阻等动态参数；
- 静态工作点的不稳定，将导致动态参数不稳定，甚至使放大电路无法正常工作。

二. 影响静态工作点稳定的因素

电源电压波动、元件老化、环境温度变化等，都会引起三极管和电路元件参数的变化，造成静态工作点的不稳定。

2.5.3 静态工作点稳定电路

一、电路组成



分压式电流负反馈静态工作点稳定电路

二、静态工作点稳定原理

目标：温度变化时，使 I_C 维持恒定。

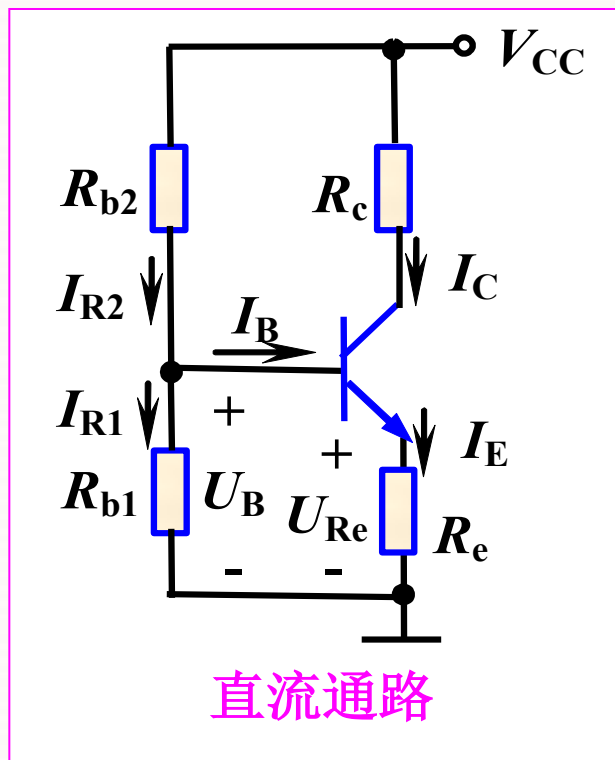
原因：

(1) 采用分压式电路，固定基极电位 U_B ；

电路参数的选取应满足 $I_{R1}, I_{R2} \gg I_B$ ，则

$$U_B \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

(2) 电阻 R_e 的直流负反馈作用。

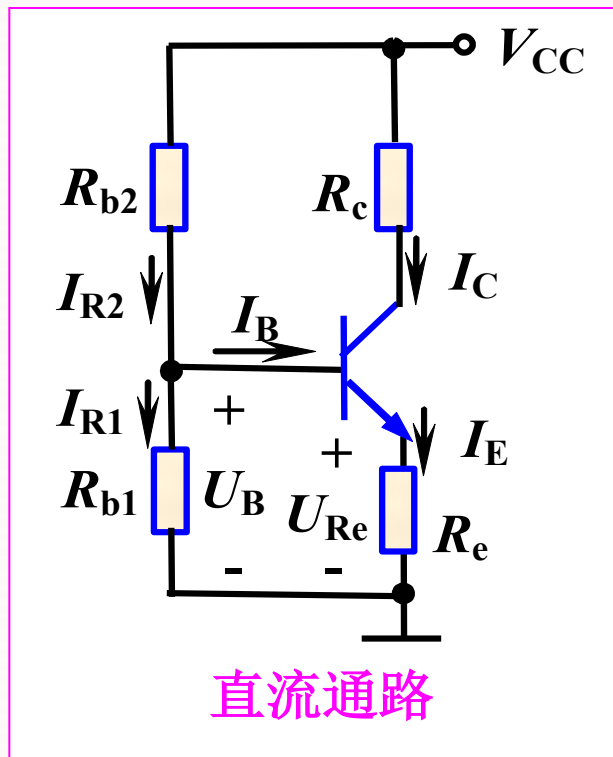


$$T \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow U_E \uparrow, U_B \text{ 不变} \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow$$

(反馈控制)

$$I_C \downarrow$$

第二章：放大电路的基本原理

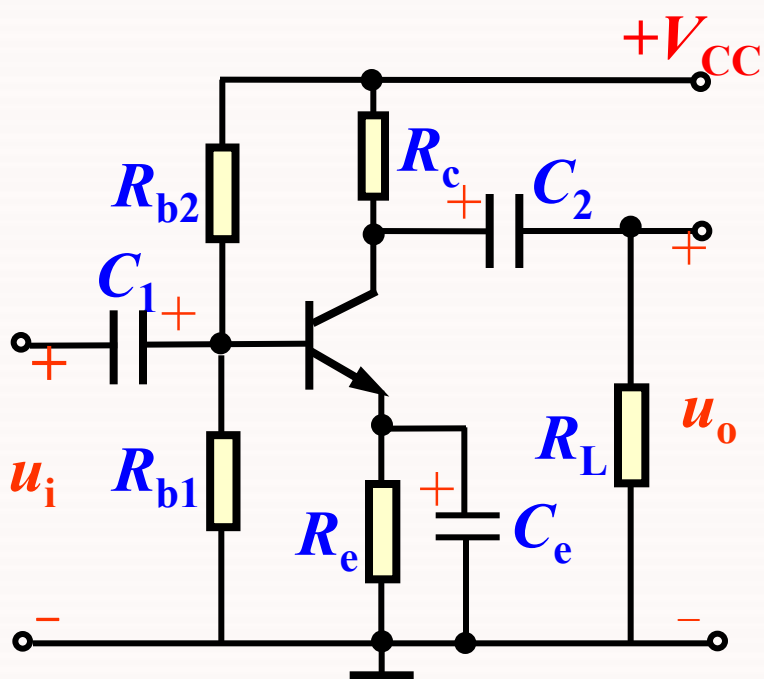


电路将输出电流 I_C 在 R_e 上的压降返送到输入回路，产生了抑制 I_C 改变的作用，使 I_C 基本不变。

这种作用称为直流电流负反馈

分压式电流负反馈静态工作点稳定电路。

第二章 放大电路的基本原理



接入 R_e ，电压放大倍数将大大降低。在 R_e 两端并联大电容 C_e ，交流电压降可以忽略，则 A_u 基本无影响。 C_e 称旁路电容

要保证 U_{BQ} 基本稳定，需要 R_{b1} 、 R_{b2} 小一些，但消耗功率增大，且输入电阻降低。实际选用 R_{b1} 、 R_{b2} 值，取 $I_R = (5 \sim 10)I_B$ ， $U_B = (5 \sim 10)U_{BE}$ 。

三、静态与动态分析

静态分析 由于 $I_R \gg I_{BQ}$, 可得

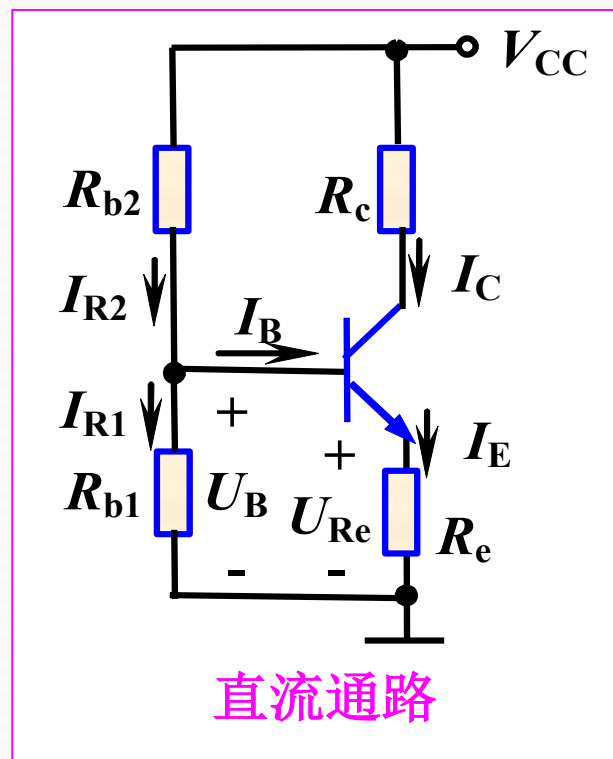
$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}$$

$$\text{则 } I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{EQ}}{R_e} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{CQ} R_c - I_{EQ} R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ} (R_c + R_e) \end{aligned}$$

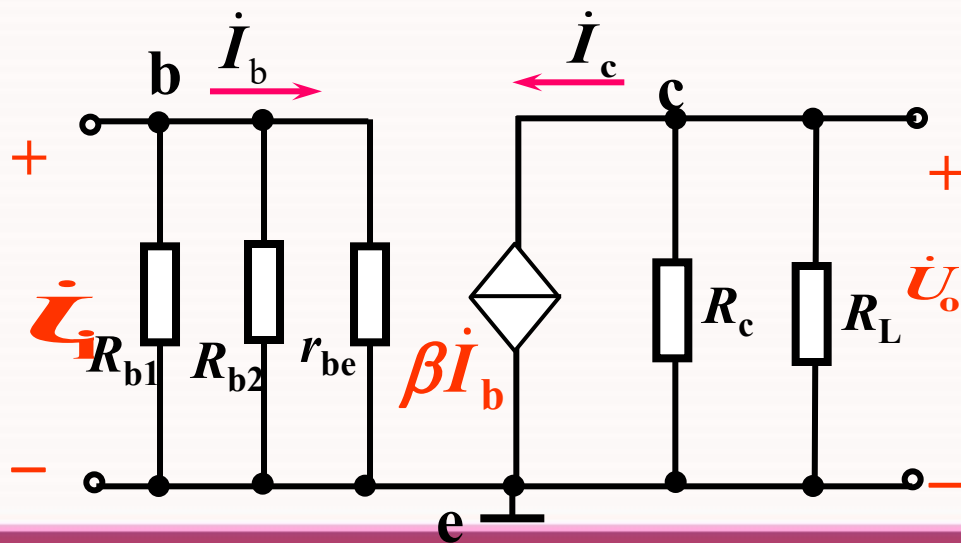
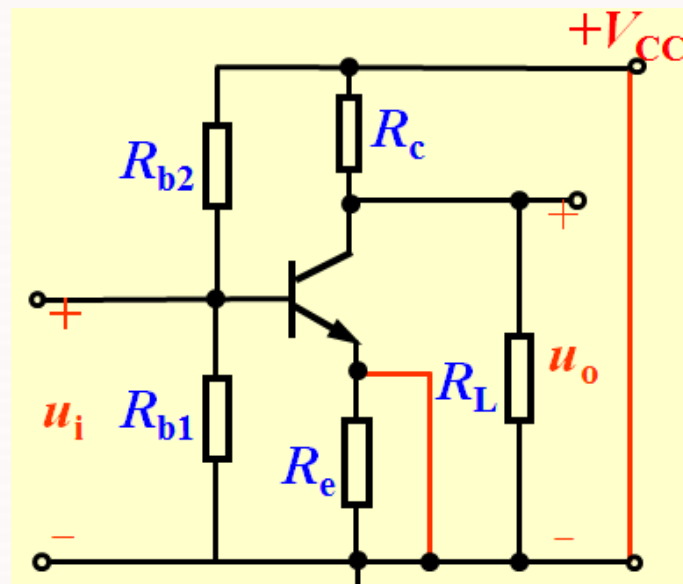
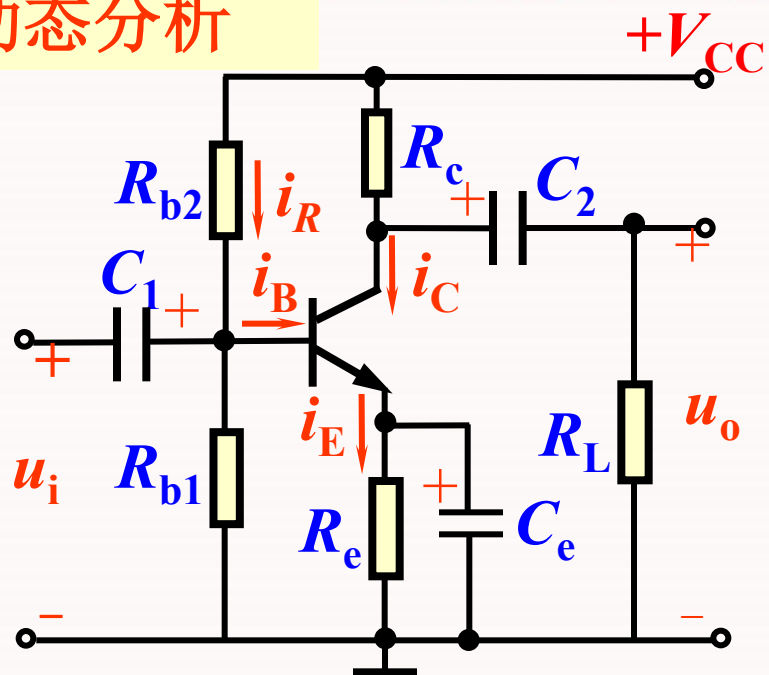
静态基极电流

$$I_{BQ} \approx \frac{I_{CQ}}{\beta}$$



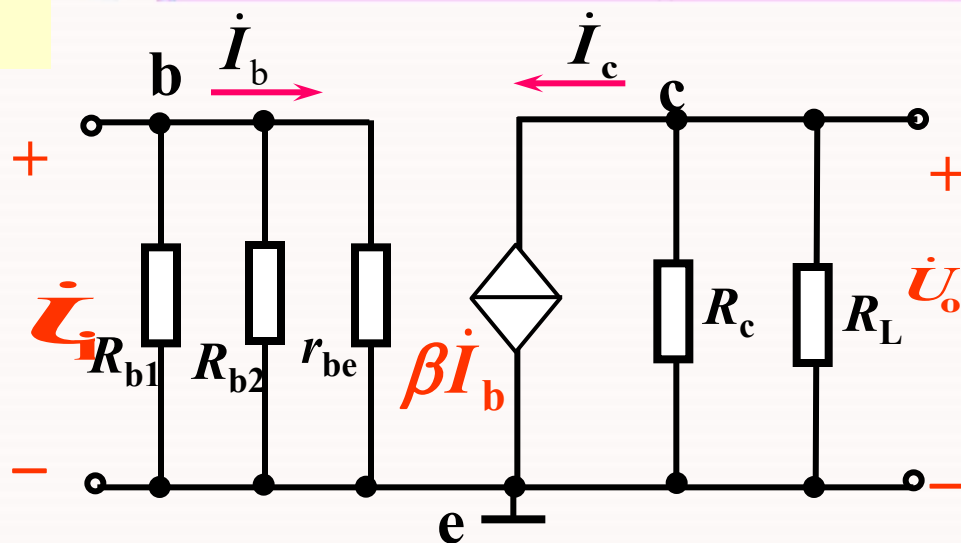
第二章 放大电路的基本原理

动态分析



第二章：放大电路的基本原理

动态分析



$$\dot{A}_u = - \frac{\beta R'_L}{r_{be}} \quad R'_L = R_c // R_L$$

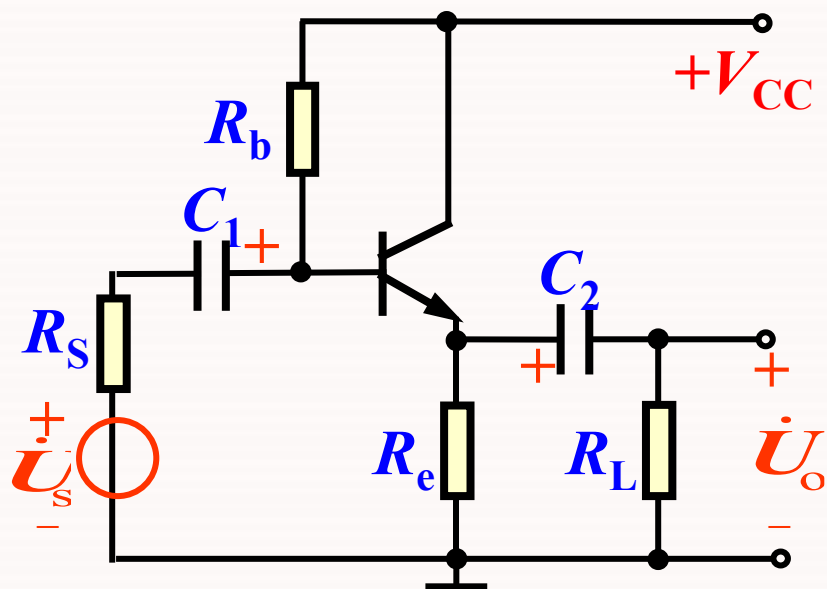
$$R_i = r_{be} // R_{b1} // R_{b2}$$

$$R_o = R_c$$

2.6 放大电路的三种基本组态

三种基本接法 { 共射组态
共集组态
共基组态

2.6.1 共集电极放大电路



共集电极放大电路

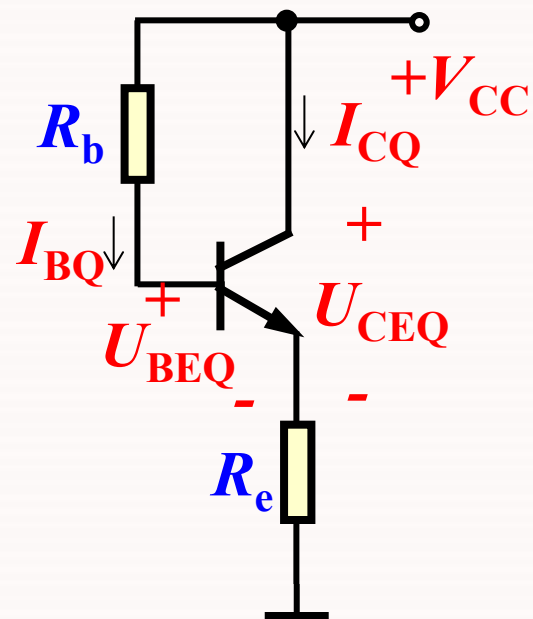
一、静态工作点

由基极回路求得静态基极电流

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$$

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

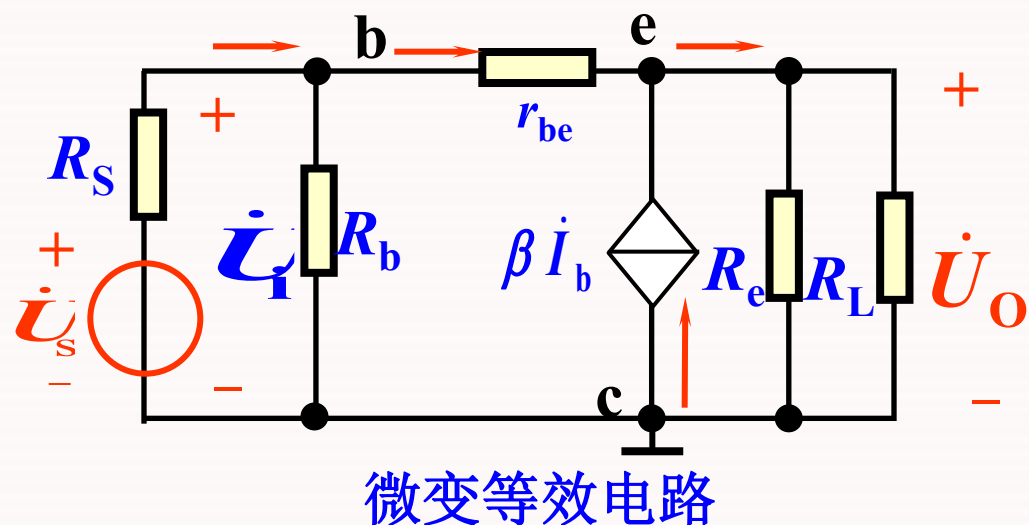
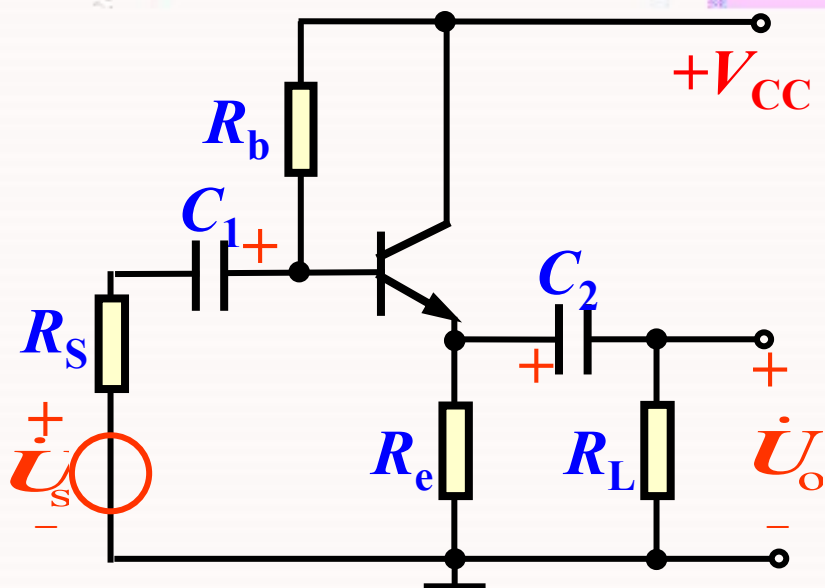
$$\begin{aligned} U_{CEQ} &= V_{CC} - I_{EQ} R_e \\ &\approx V_{CC} - I_{CQ} R_e \end{aligned}$$



直流通路

第二章：放大电路的基本原理

二、动态参数



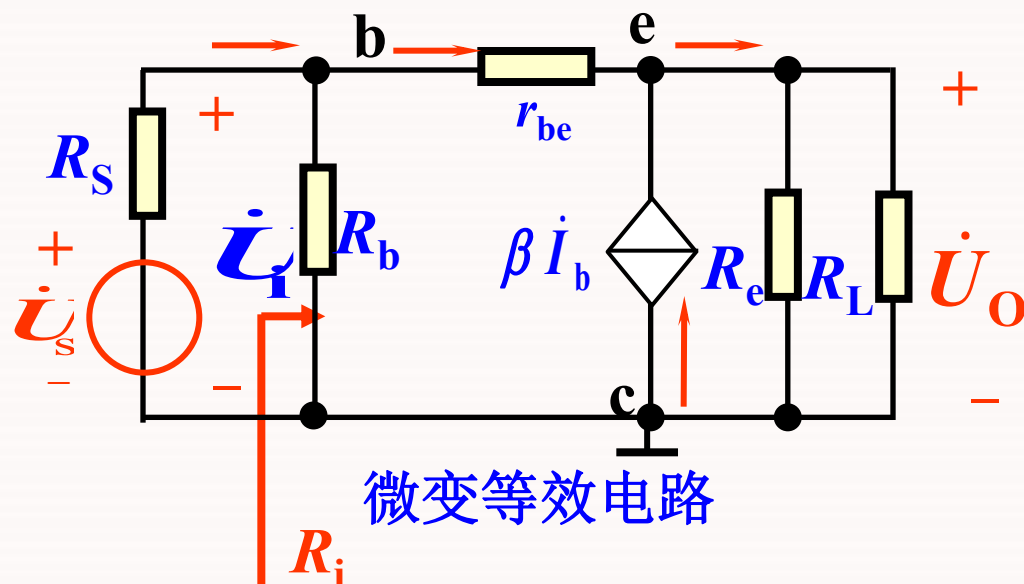
电压放大倍数

$$\dot{U}_o = \dot{U}_i \frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)}$$

电压放大倍数恒小于 1，而接近 1，且输出电压与输入电压同相，又称射极跟随器。

第二章 放大电路的基本原理

输入电阻



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

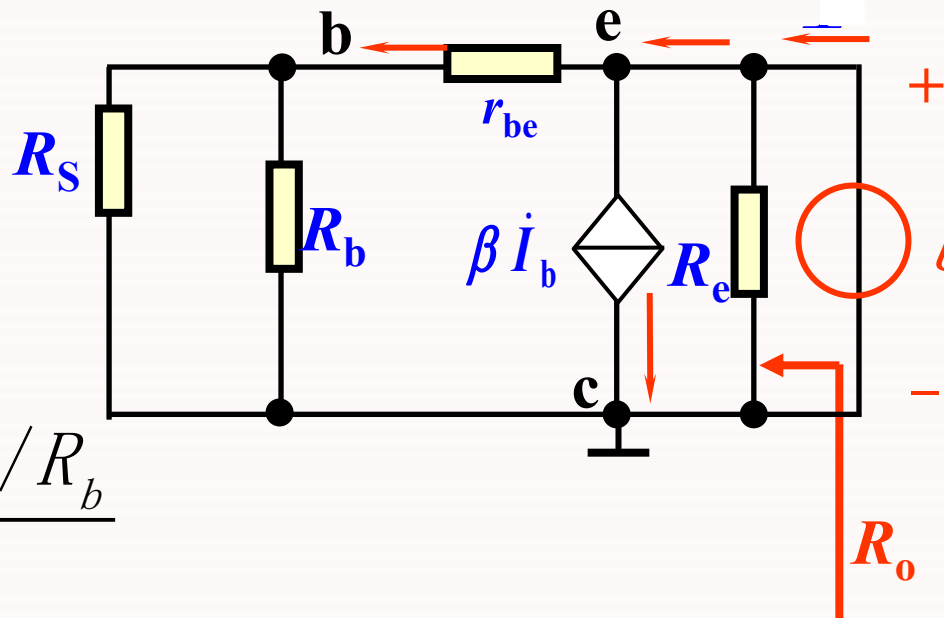
不考虑输入端的电阻 R_b

$$R_i = r_{be} + (1 + \beta) (R_e // R_L)$$

输入电阻较大。

第二章 放大电路的基本原理

输出电阻



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

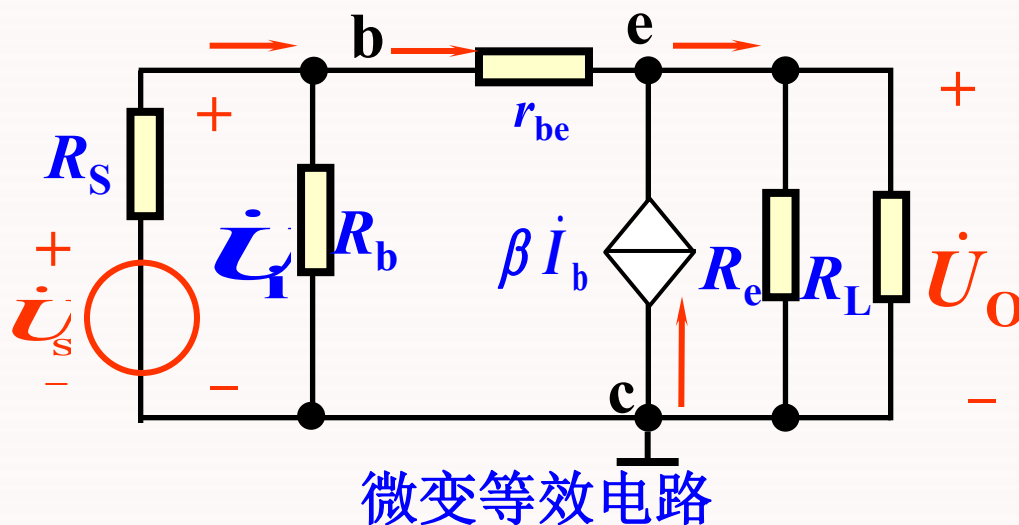
不考虑输出端的电阻 R_e

求输出电阻 R_o 的等效电路

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

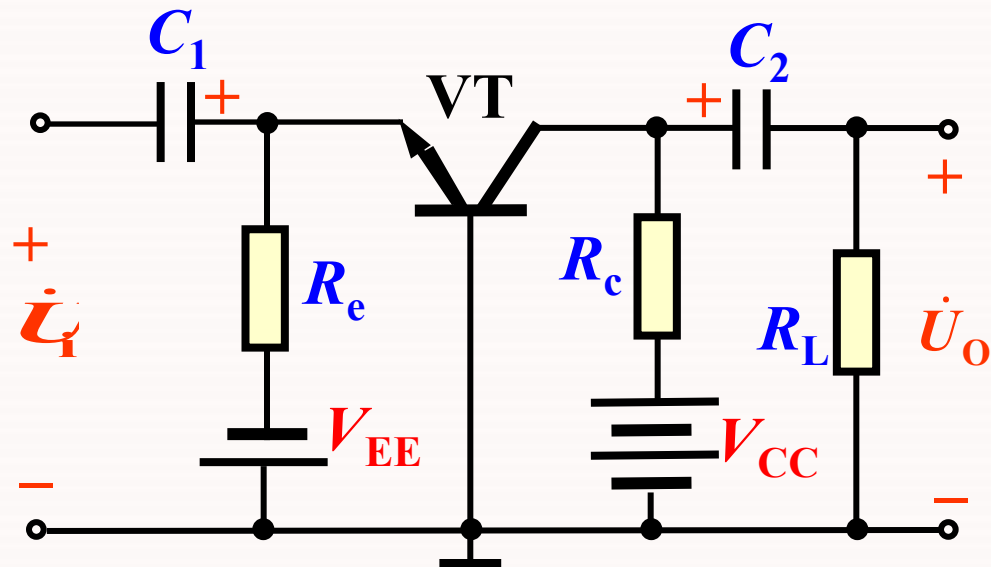
输出电阻低，故带载能力比较强。

电流放大能力

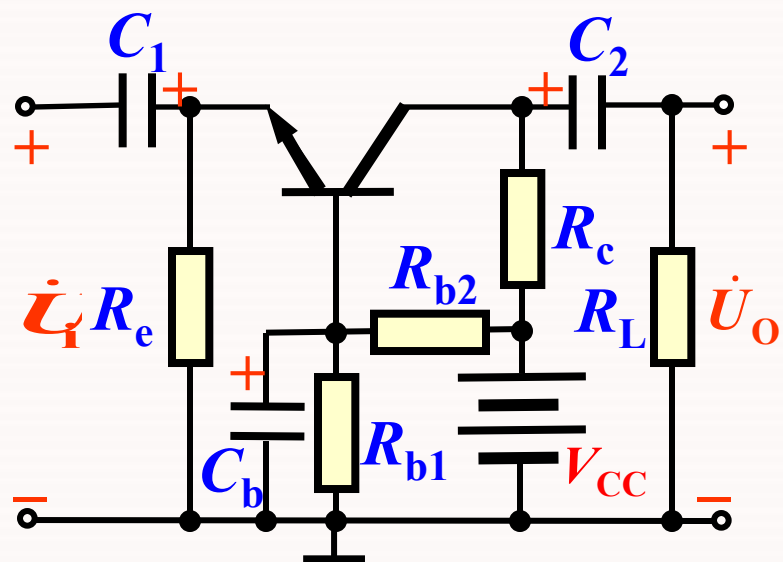


输入端电流为 \dot{I}_b ，输出端电流为 $\beta \dot{I}_b$ ，因此电流放大能力为 β 。

2.6.2 共基极放大电路



(a) 原理电路



(b) 实际电路

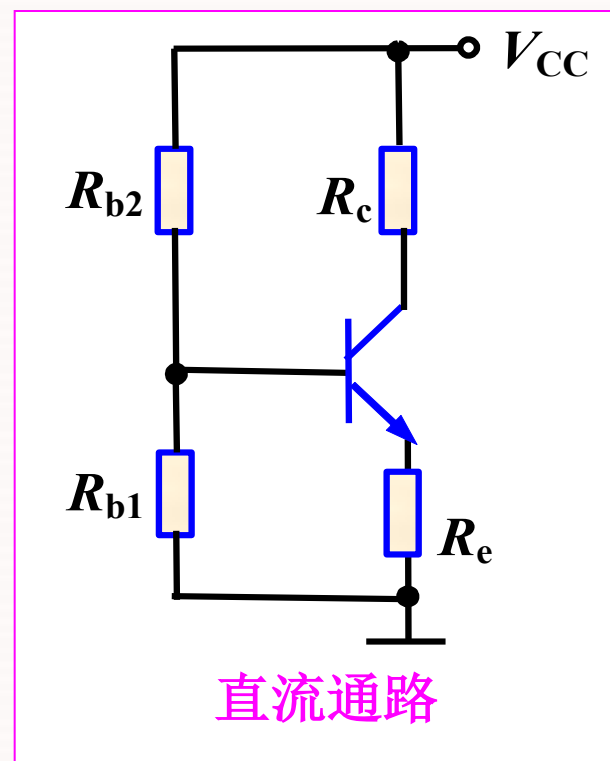
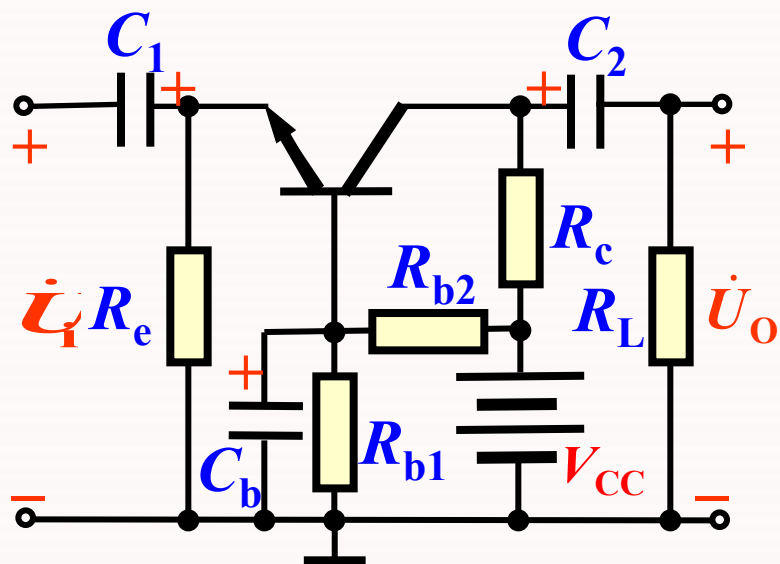
共基极放大电路

V_{EE} 保证发射结正偏；
 V_{CC} 保证集电结反偏；三极管
 工作在放大区。

实际电路采用一个电
 源 V_{CC} ，用 R_{b1} 、 R_{b2} 分
 压提供基极正偏电压。

第二章：放大电路的基本原理

一、静态工作点 (I_{BQ} , I_{CQ} , U_{CEQ})

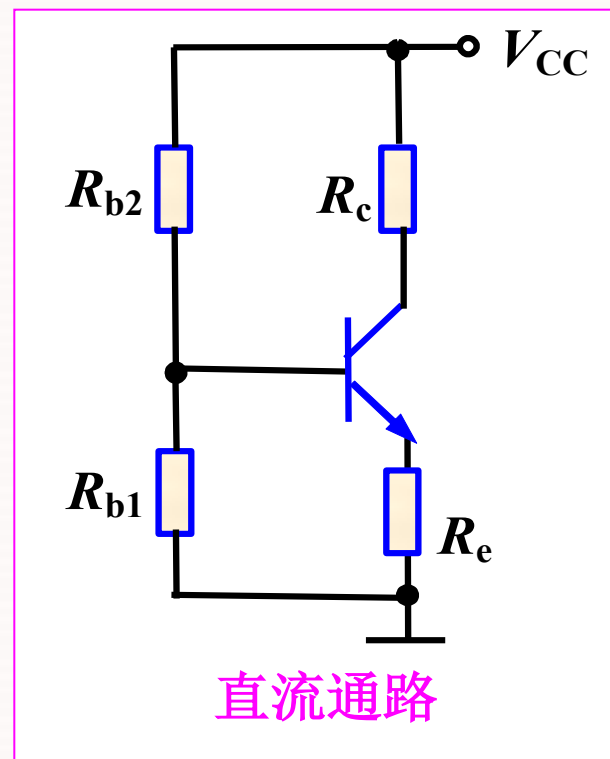


第二章 放大电路的基本原理

$$I_{\text{EQ}} = \frac{U_{\text{BQ}} - U_{\text{BEQ}}}{R_{\text{e}}} = \frac{1}{R_{\text{e}}} \left(\frac{R_{\text{b1}}}{R_{\text{b1}} + R_{\text{b2}}} V_{\text{CC}} - U_{\text{BEQ}} \right) \approx I_{\text{CQ}}$$

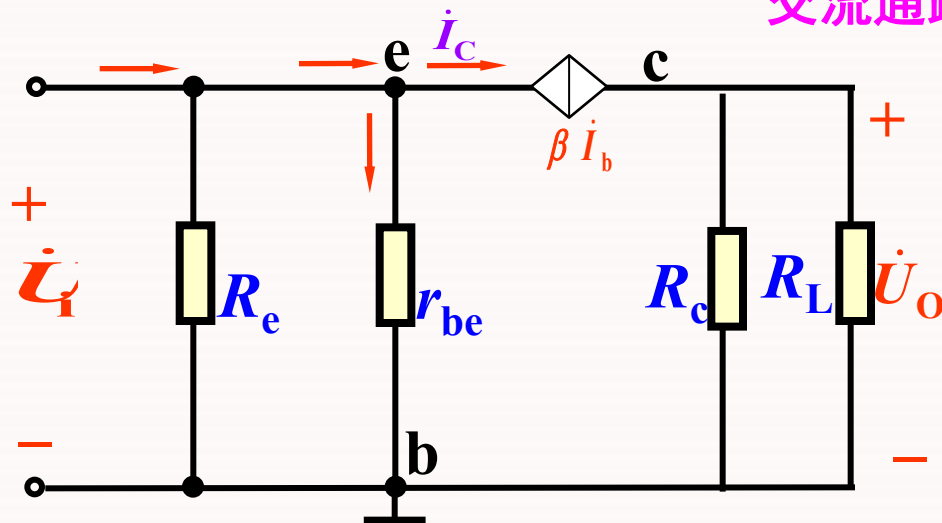
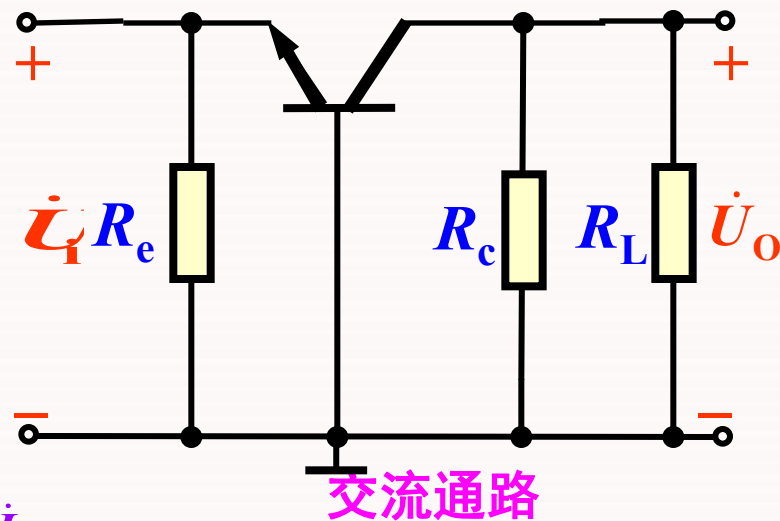
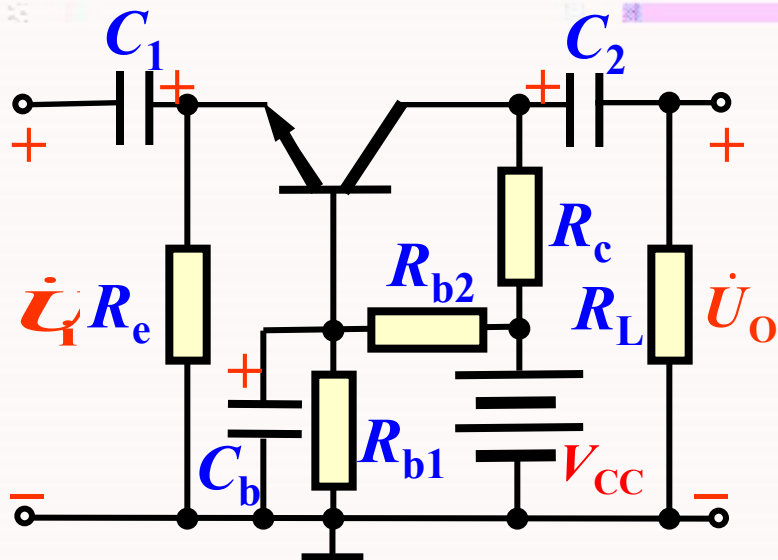
$$I_{\text{BQ}} = \frac{I_{\text{EQ}}}{1 + \beta}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{CEQ}} &= V_{\text{CC}} - I_{\text{CQ}} R_{\text{c}} - I_{\text{EQ}} R_{\text{e}} \\ &\approx V_{\text{CC}} - I_{\text{CQ}} (R_{\text{c}} + R_{\text{e}}) \end{aligned}$$



第二章：放大电路的基本原理

二、动态参数

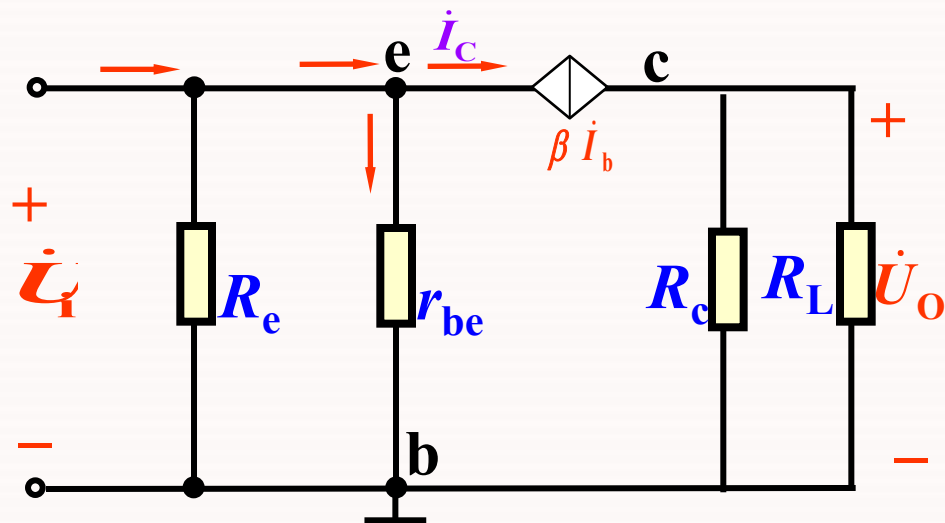


微变等效电路

第二章：放大电路的基本原理

电压放大倍数

$$\dot{U}_o = \dot{U}_i \frac{r_c // R_L}{r_{be}}$$



微变等效电路

共基极放大电路具有电压放大作用，电压放大能力与共射电路相当，没有负号，说明该电路输入、输出信号同相位。

第二章 放大电路的基本原理

输入电阻

$$R_i = R_e // \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

不考虑输入端的电阻 R_e

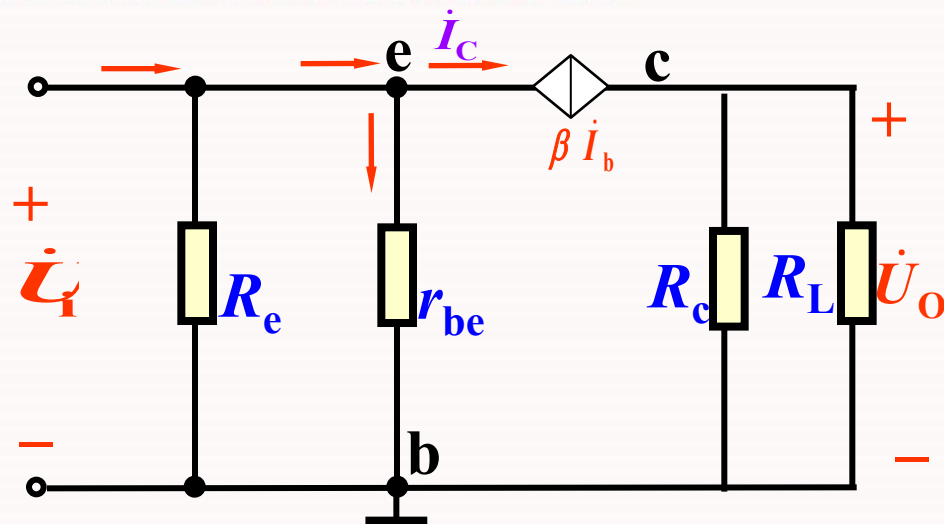
$$R_i = \frac{r_{be}}{1 + \beta}$$

输入电阻小

输出电阻

$$R_o = R_c$$

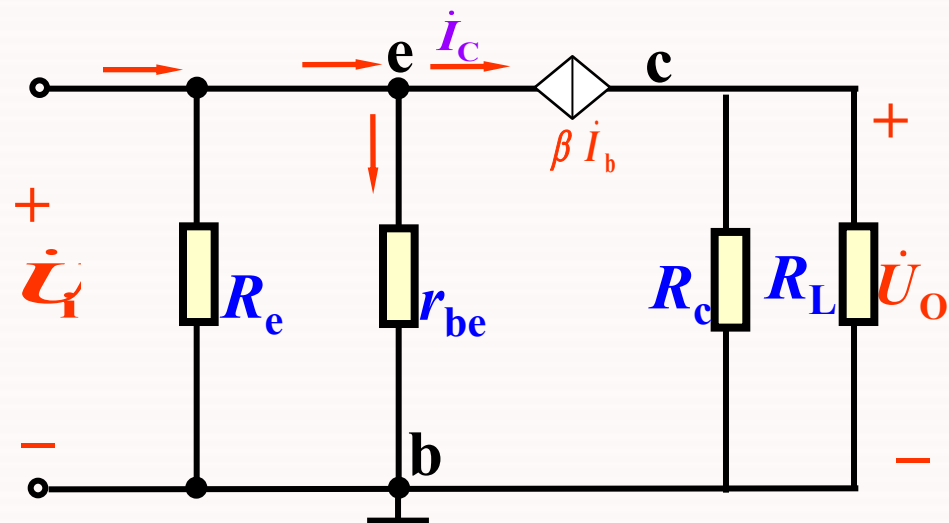
输出电阻与共射电路相当



微变等效电路

第二章 放大电路的基本原理

电流放大能力



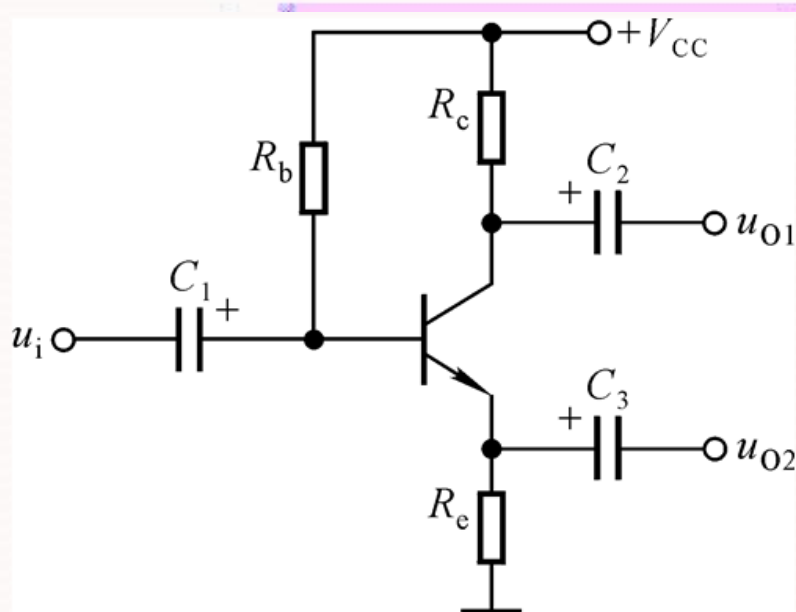
微变等效电路

输入端电流为 i_e ，输出端电流为 i_c ，电压放大能力。

2.6.3 三种基本组态的比较

- 共射电路既能放大电压又能放大电流，输入电阻在三种电路中居中，输出电阻较大，频带较窄。常做为低频放大电路的单元电路。
- 共集电路只能放大电流不能放大电压，具有电压跟随的特点，是三种接法中输入电阻最大、输出电阻最小的电路。常用于多级放大电路的输入级和输出级及作为隔离缓冲用的中间级。
- 共基电路只能放大电压不能放大电流，电压放大倍数和输出电阻与共射电路相当，输入电阻小，使三极管结电容的影响不显著，因而频率响应得到很大改善，常用于宽频带放大电路。

第二章：放大电路的基本原理



【例】 放大电路如图所示，画出分别从 u_{O1} ， u_{O2} 输出时电路的微变等效电路，写出计算电压放大倍数 $\dot{A}_{u1} = \frac{\dot{u}_{O1}}{\dot{u}_i}$ 和 $\dot{A}_{u2} = \frac{\dot{u}_{O2}}{\dot{u}_i}$ 的表达式，并画出当 $R_c = R_e$ 时的输出电压 u_{O1} 和 u_{O2} 的波形（与输入正弦电压 u_i 相对应）

2.8 多级放大电路

2.8.1 多级放大电路的耦合方式

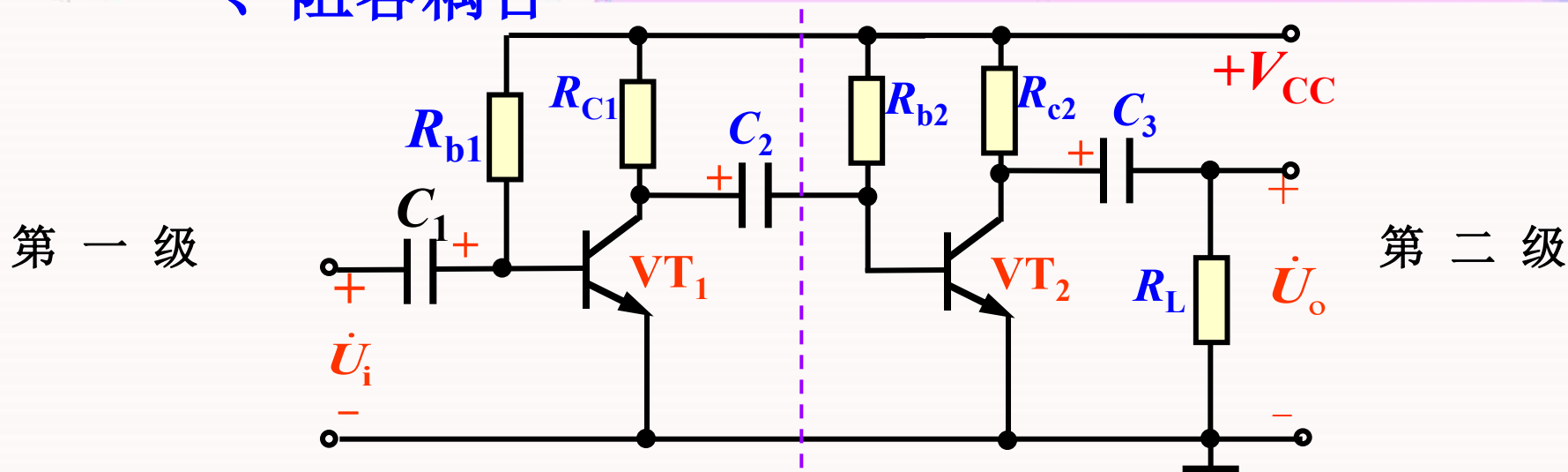
级间耦合：多级放大电路的每一个基本放大电路称为一级；级与级之间的连接称之为耦合。

三种常见的耦合方式

- 阻容耦合
- 直接耦合
- 变压器耦合

第二章：放大电路的基本原理

一、阻容耦合



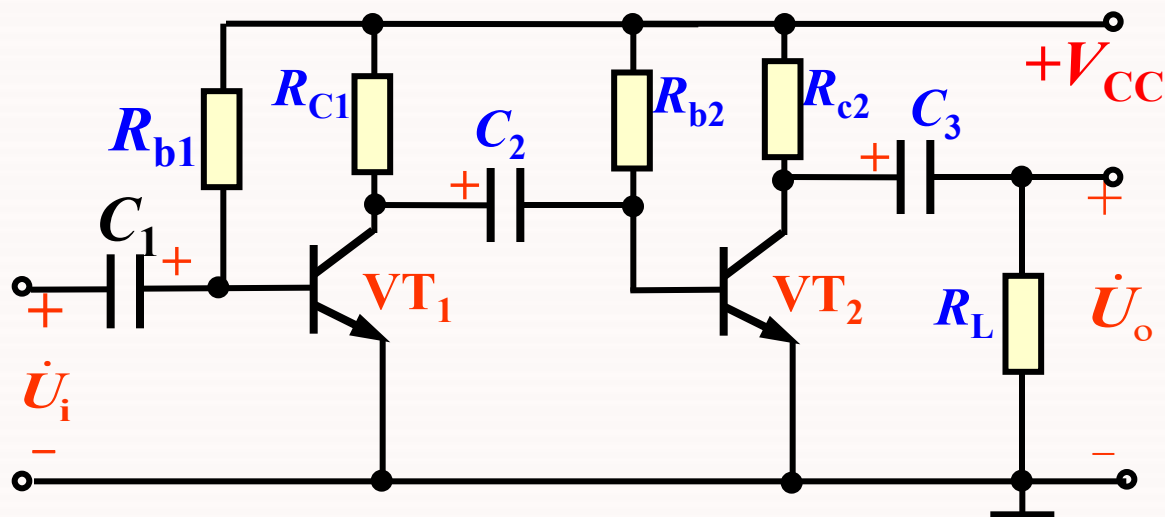
优点：

阻容耦合两级放大电路

(1) 前、后级直流电路互不相通，静态工作点相互独立，给电路的分析、设计和调试带来很大方便；

(2) 选择足够大电容，可以做到在一定频率范围内，前一级输出信号几乎不衰减地加到后一级输入端，使信号得到充分利用。

第二章：放大电路的基本原理

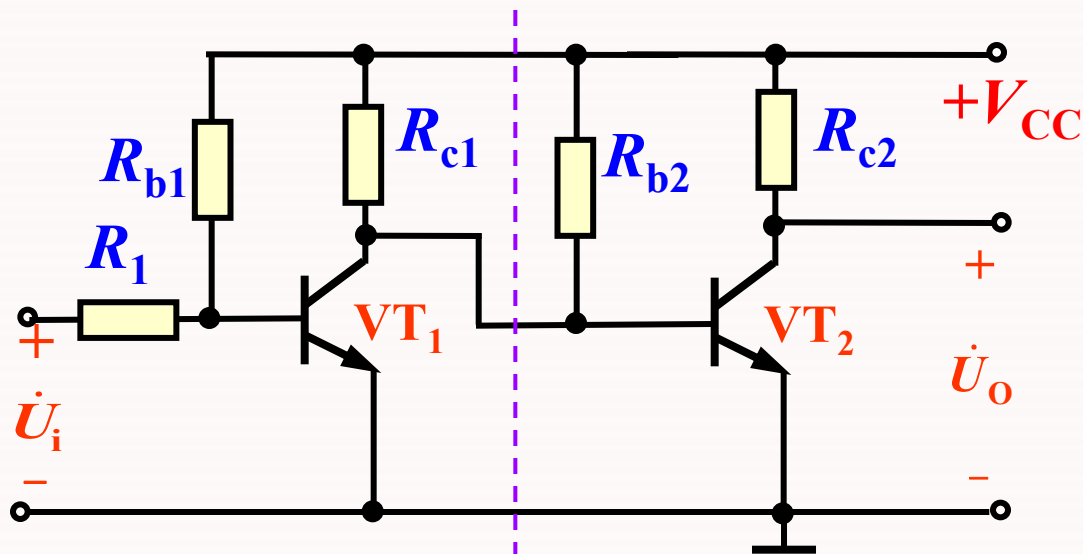


缺点：

- (1) 不能放大直流信号、缓慢变化的信号；
- (2) 由于耦合电容容量较大，所以不便于集成化。

第二章：放大电路的基本原理

二、直接耦合



两个单管放大电路简单的直接耦合

优点：

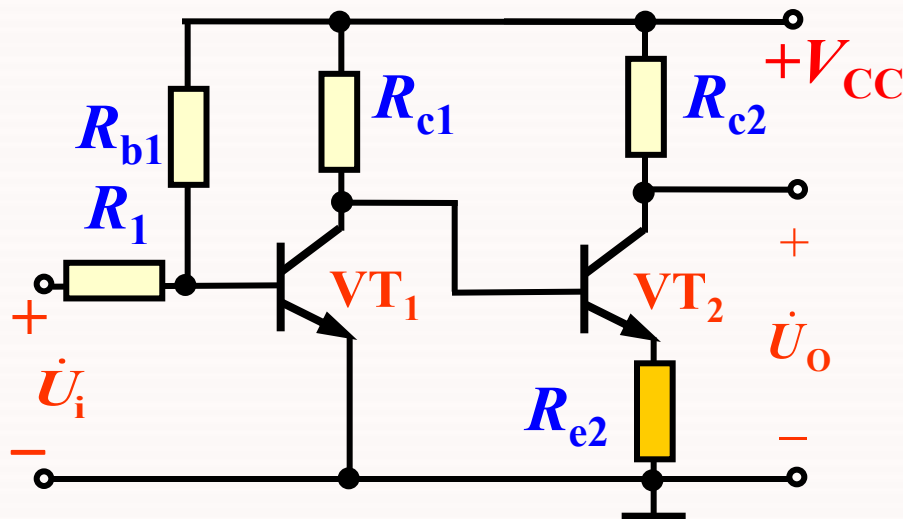
- (1) 可以放大交流和缓慢变化及直流信号；
- (2) 便于集成化。

缺点：

- (1) 各级静态工作点互相影响；
- (2) 存在零点漂移。

第二章：放大电路的基本原理

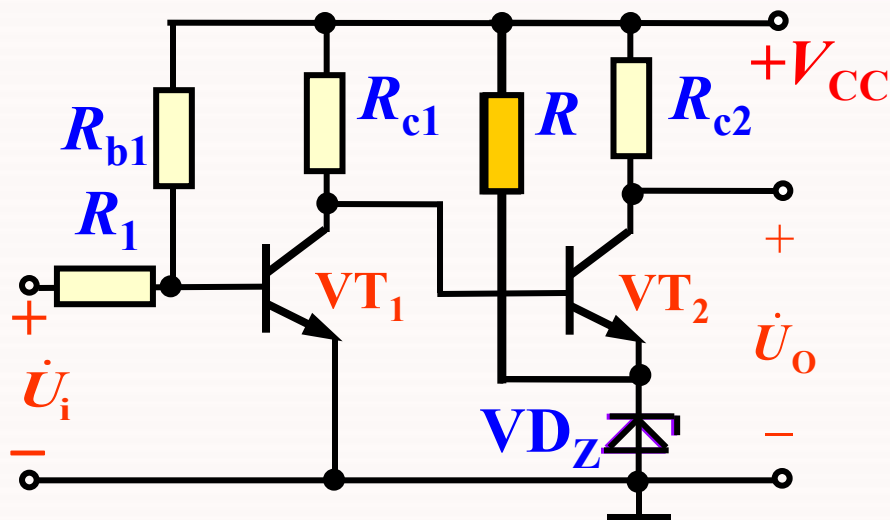
1. 解决合适静态工作点的几种改进电路



电路中接入 R_{e2} ，保证第一级集电极有较高的静态电位。

但 R_{e2} 的接入将大大降低第二级的电压放大倍数，从而影响整个放大电路的放大能力。

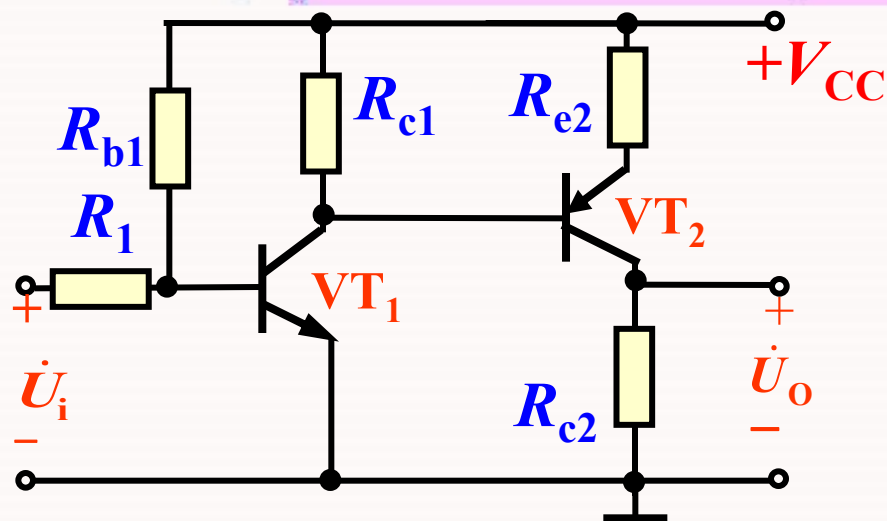
第二章：放大电路的基本原理



稳压管动态电阻很小，可以使第二级的放大倍数损失减小。

但前述两个电路，当耦合级数更多时，将逐级抬高集电极的静态电位，使之接近于电源电压，引起后级的静态工作点不合适。

第二章：放大电路的基本原理



采用NPN-PNP的耦合方式，可获得合适的工作点。为经常采用的方式。

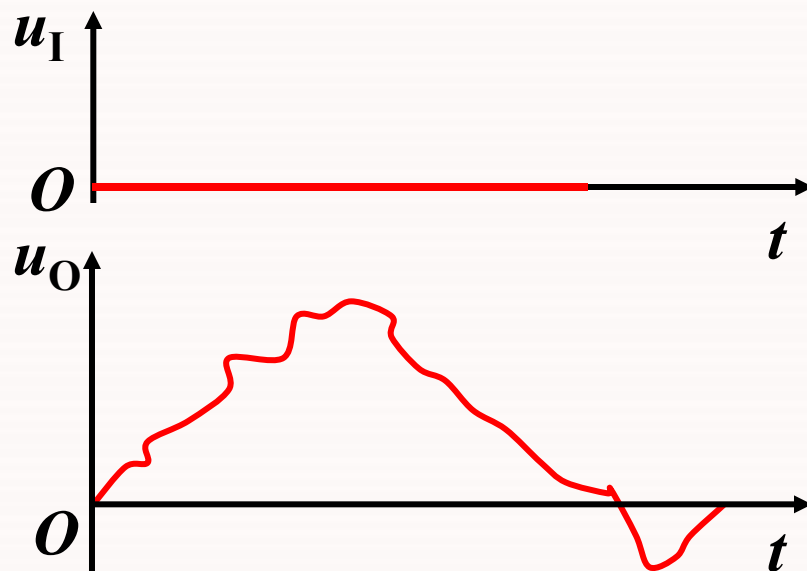
2. 零点漂移

直接耦合时，输入电压为零，但输出电压离开零点，并缓慢地发生不规则变化的现象。

主要原因：放大器件的参数受温度影响而使 Q 点不稳定。故也称**温度漂移**。

思考：为什么直接耦合放大电路有零点漂移？

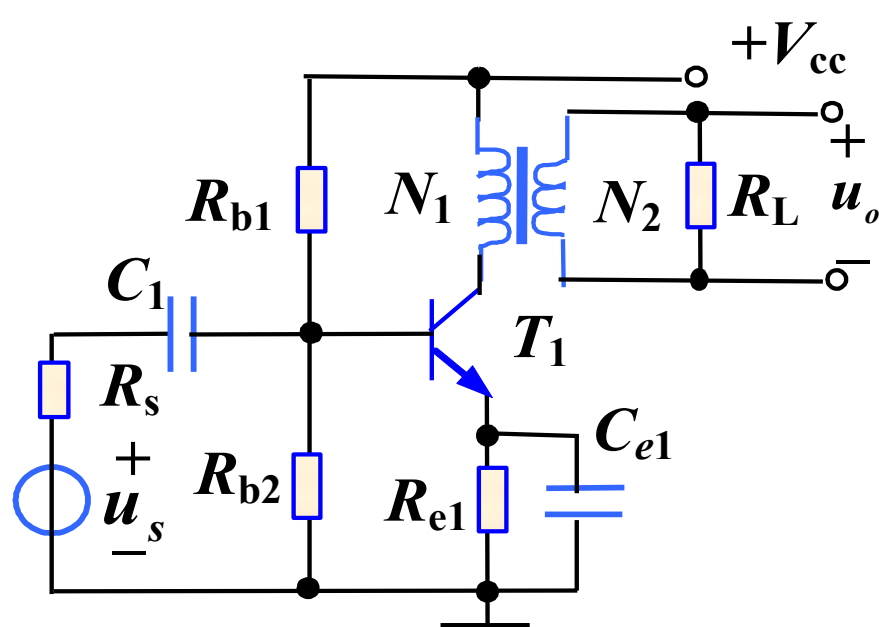
放大电路级数愈多，放大倍数愈高，零点漂移问题愈严重。



零点漂移现象

第二章：放大电路的基本原理

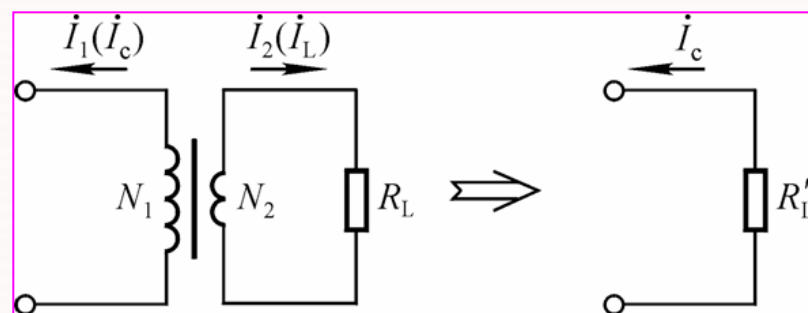
三、变压器耦合



变压器耦合放大电路

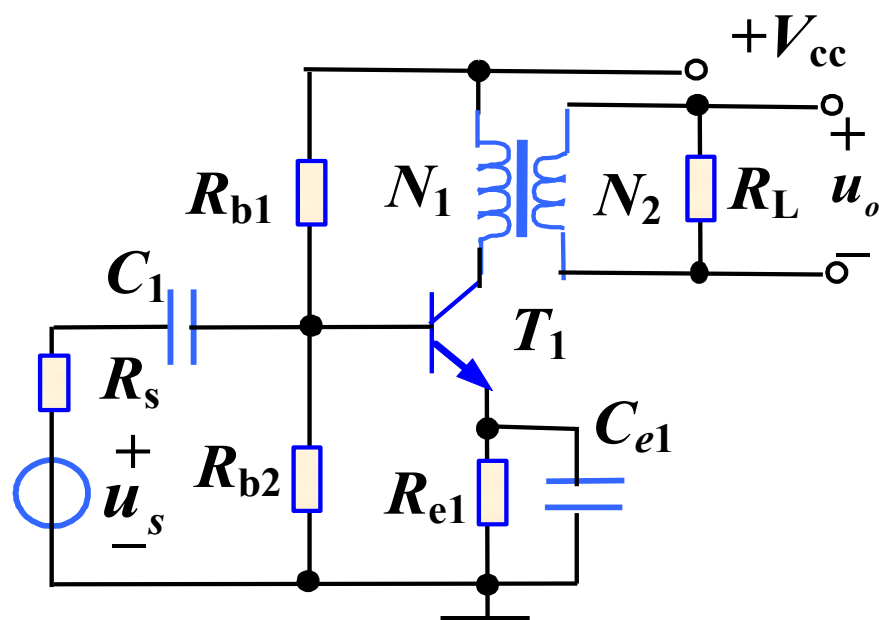
优点：

- (1) 静态工作点互相独立；
- (2) 能实现阻抗变换。



$$R'_L = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 R_L = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_L$$

三、变压器耦合



变压器耦合放大电路

缺点：

- (1) 变压器笨重；
- (2) 无法集成化；
- (3) 直流和缓慢变化信号不能通过变压器。

第二章：放大电路的基本原理

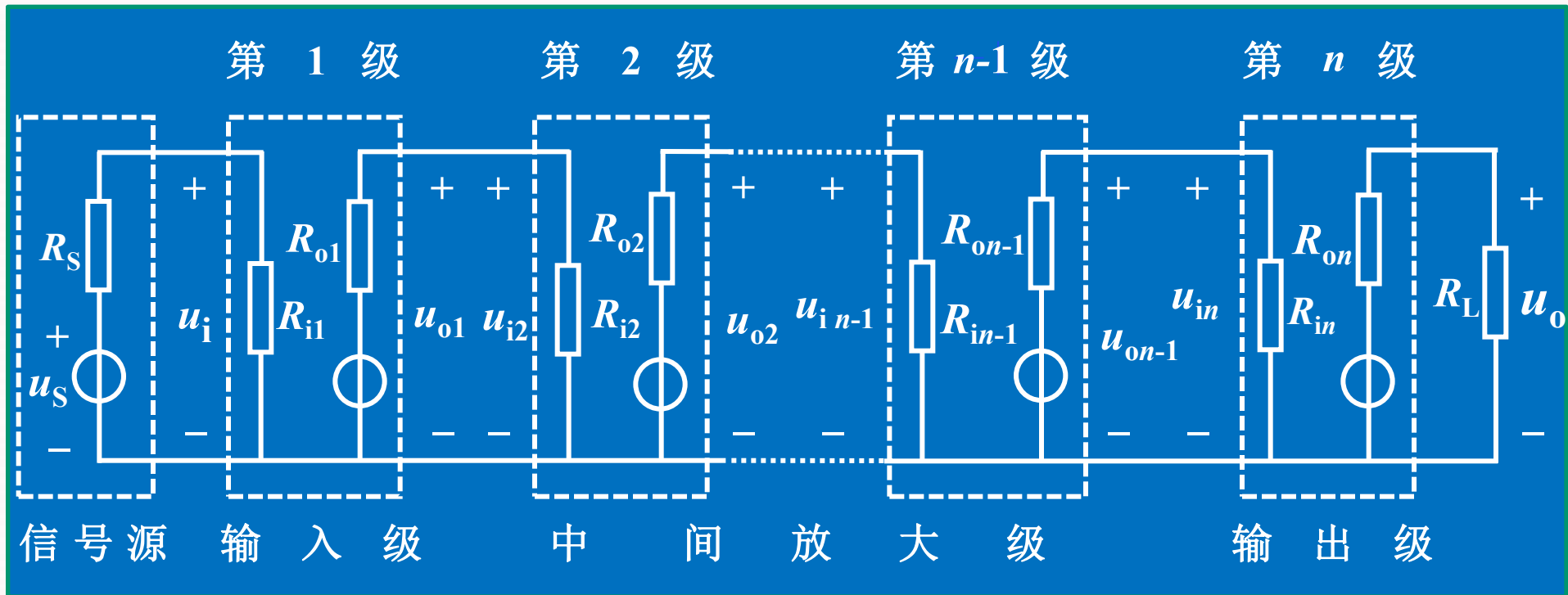
三种耦合方式的比较

	阻容耦合	直接耦合	变压器耦合
特点	各级静态工作点相互独立	能放大直流信号和缓慢变化的信号； 适合集成化	各级静态工作点相互独立； 可以实现阻抗变换
存在问题	不能放大直流信号与缓慢变化的信号； 不适合集成化	各级工作点互相影响； 有零点漂移现象	不能放大直流信号与缓慢变化的信号； 不适合集成化
适合场合	分立元件交流放大电路	集成放大电路，直流放大电路	低频功率放大电路，调谐放大器。

第二章：放大电路的基本原理

2.8.2 多级放大电路的动态参数

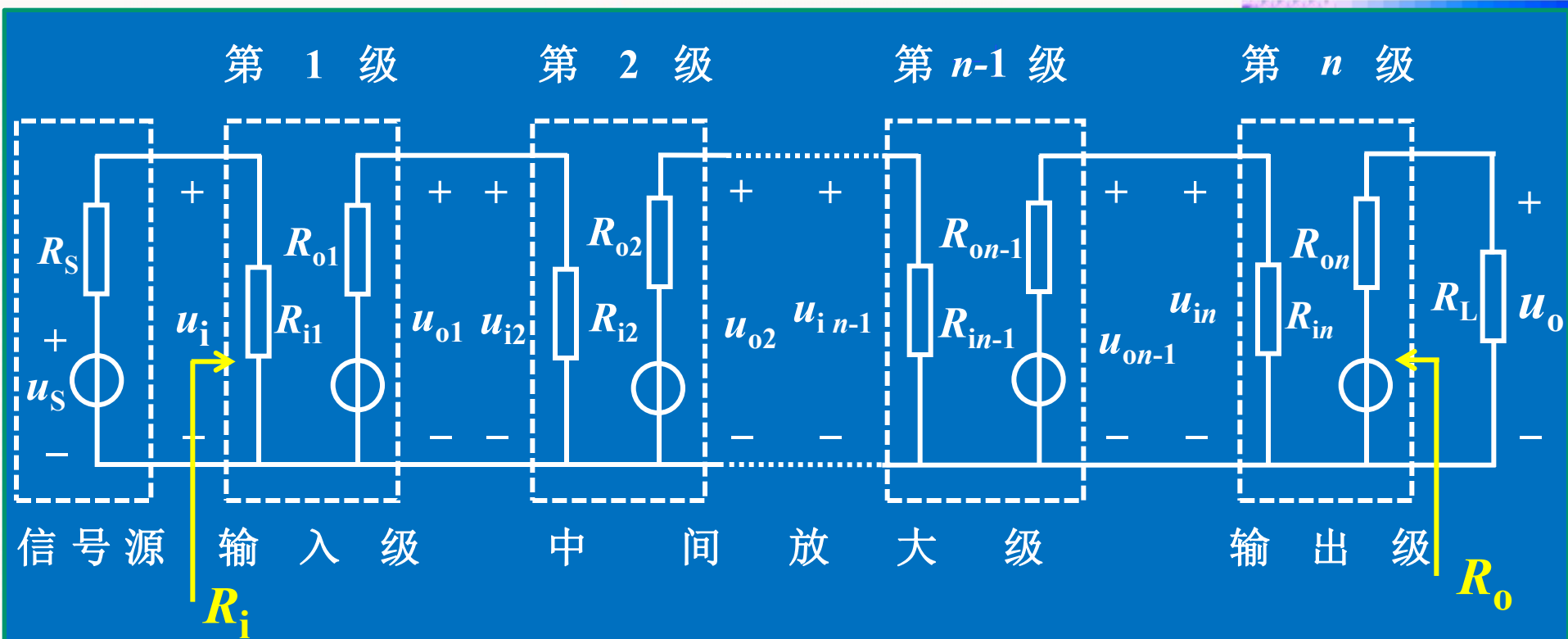
一、电压放大倍数



总电压放大倍数等于各级电压放大倍数的乘积，即

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdots \dot{A}_{un}$$

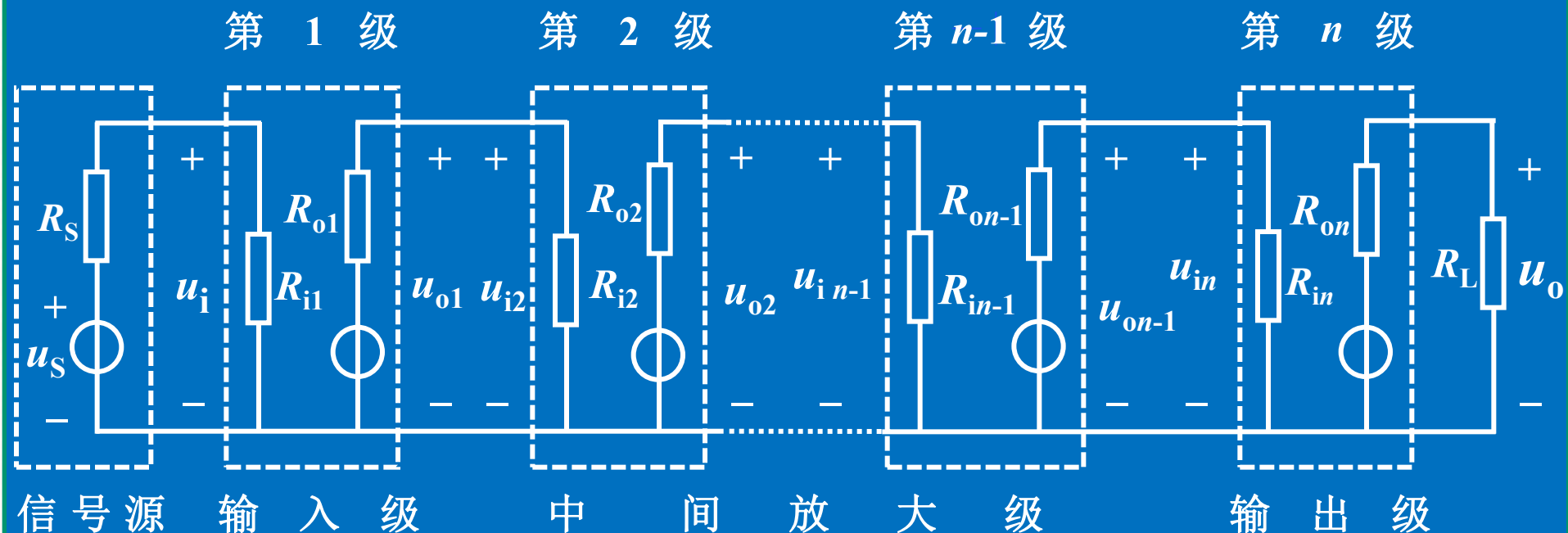
第二章：放大电路的基本原理



二、输入电阻和输出电阻

输入电阻 $R_i = R_{i1}$

输出电阻 $R_o = R_{on}$



多级放大电路动态分析时应注意的两个问题

- 第 i 级放大电路的输入电阻应视为第 $i-1$ 级放大电路的负载电阻
- 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