

医学电子学基础

Medical Electronics

医学影像学院
电子技术教研室
祝元仲

2016年4月



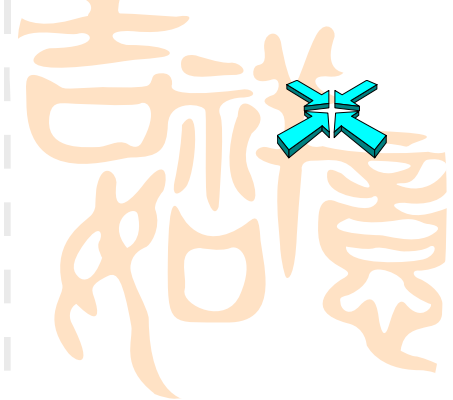


第三章 生物医学常用放大器



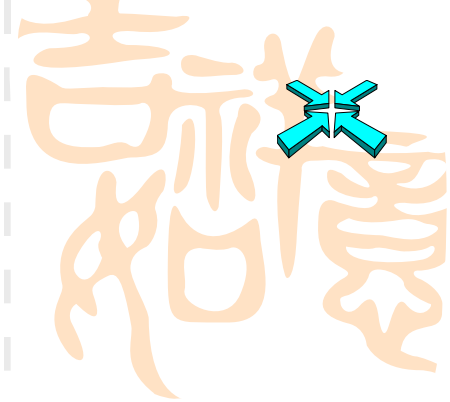
- 第一节 生物电信号的特点
- 第二节 负反馈放大器
- 第三节 直流放大器
- 第四节 功率放大器





脑电波检测仪

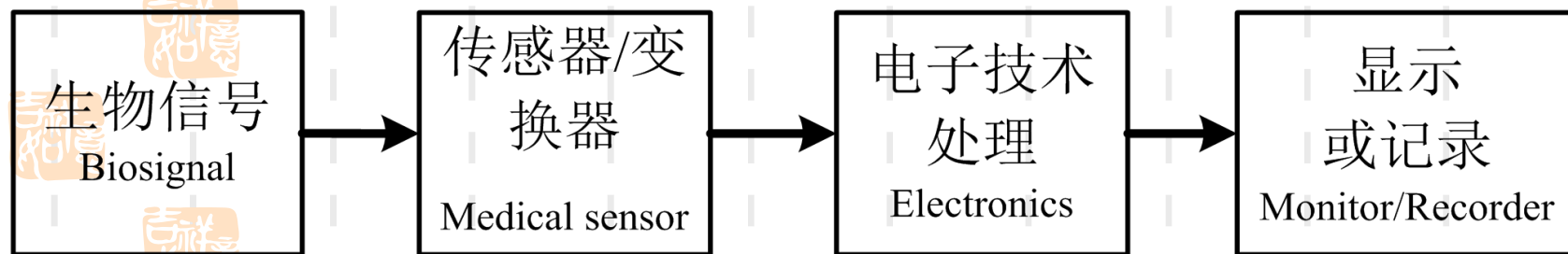




心电监护设备



利用电子技术，可以接收生物信号，并进行滤波、放大、信号加工、A/D转换等电子技术处理，使得生命现象能够客观又定量地显示和计算。



生物医学信号的放大和处理原理框图

第一节 生物电信号的特点

表1.1 常用医用信号的特点

机体参数	频率 (Hz)	电压	阻抗
脑电 (EEG)	0.5~70	10 μ V~300 μ V	10~50k Ω
肌电 (EMG)	10~2000	10 μ V~15	1~10k Ω
心电 (ECG)	0.1~200	100 μ V~2mV	1~30k Ω
视网膜电 (ERG)	0~200	50 μ V~1mV	几十k Ω
眼震电 (ENG)	0~60	50 μ V~1mV	1~30k Ω
眼电 (EOG)	0~60	50 μ V~1mV	1~30k Ω
皮电阻 (GSR)	0.03~10	100 μ V~5mV	1~30k Ω

一、生物电信号的基本特性

机体参数	频率 (Hz)	电压	阻抗
脑电 (EEG)	0.5~70	10 μ V~300 μ V	10~50k Ω
肌电 (EMG)	10~2000	10 μ V~15	1~10k Ω
心电 (ECG)	0.1~200	100 μ V~2mV	1~30k Ω
视网膜电 (ERG)	0~200	50 μ V~1mV	几十k Ω
眼震电 (ENG)	0~60	50 μ V~1mV	1~30k Ω
眼电 (EOG)	0~60	50 μ V~1mV	1~30k Ω

从表中可以看出：

- 1.生物电信号的频带集中在低频和超低频范围内。
- 2.通常生物电信号的幅度较低
- 3.生物体的阻抗很高

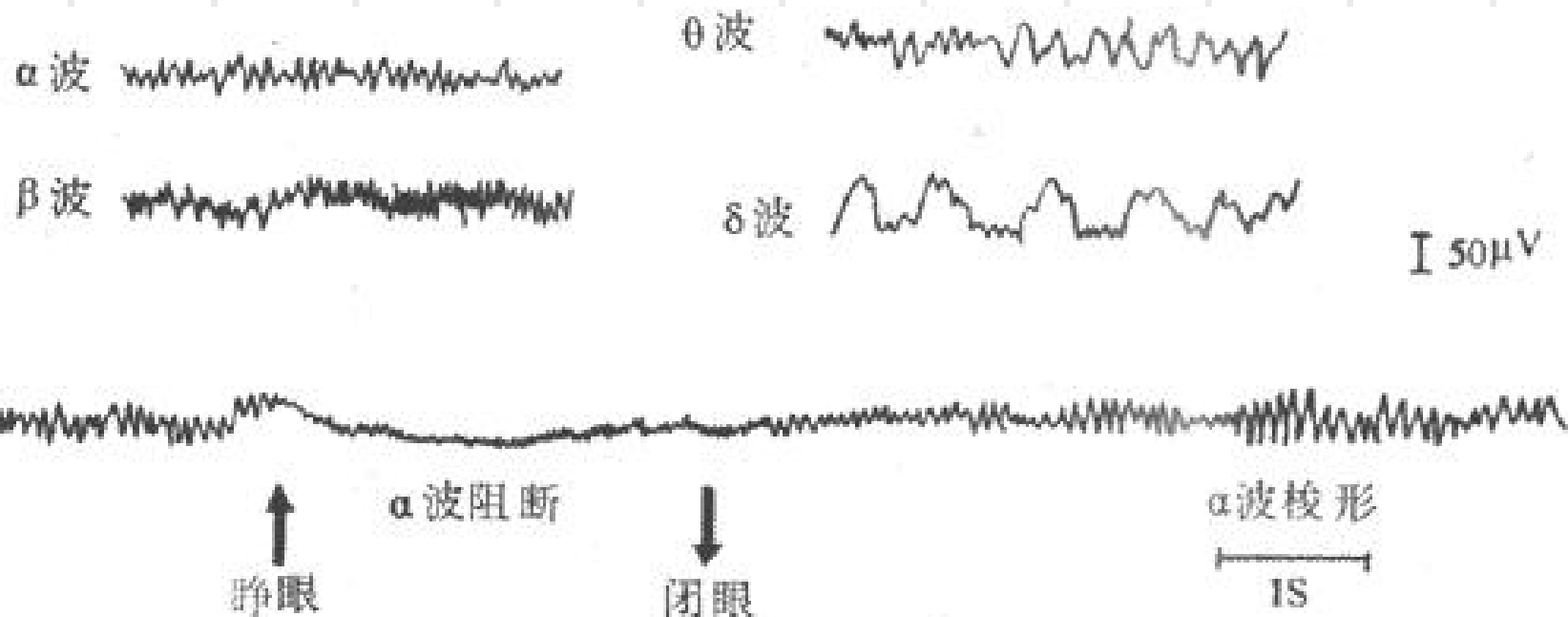


要求
范围内。

- 2.通常生物电信号的幅度较低
- 3.生物体的阻抗很高

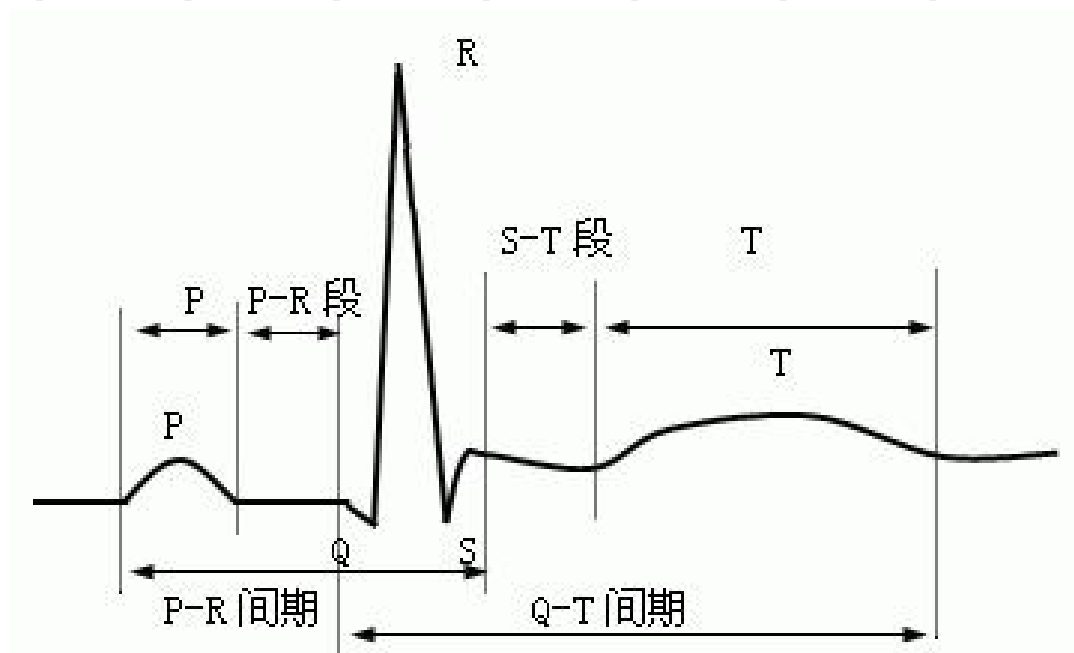
由于生物电信号非常微弱，放大器必须具有高增益：

三、生物医学信号的频谱 (Spectrum)



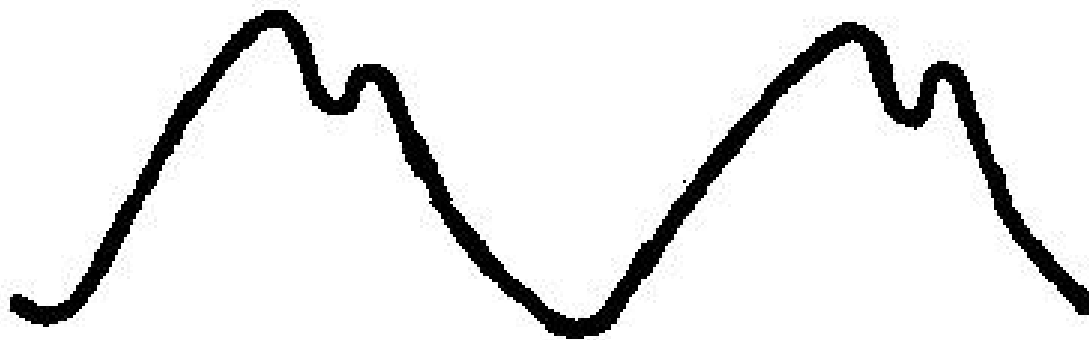
脑电波波形图

三、生物医学信号的频谱



心电波波形图

三、生物医学信号的频谱



动脉脉波波形图



傅里叶的两个最重要的贡献:

- “周期信号都可以表示为成谐波关系的正弦信号的加权和”——傅里叶的第一个主要论点

- “非周期信号都可以用正弦信号的加权积分来表示”——傅里叶的第二个主要论点



傅里叶, J.-B.-J.

傅里叶（法国数学家，1768 – 1830）

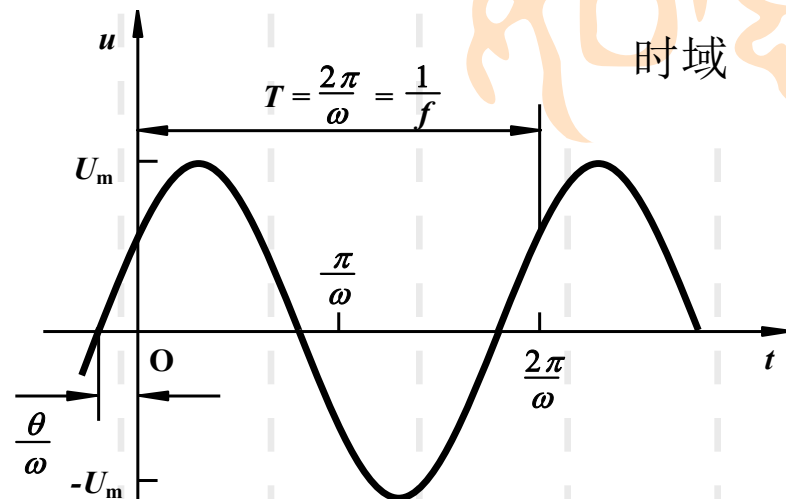
1、周期信号的频谱

A. 正弦信号 (Sinusoidal Signal)

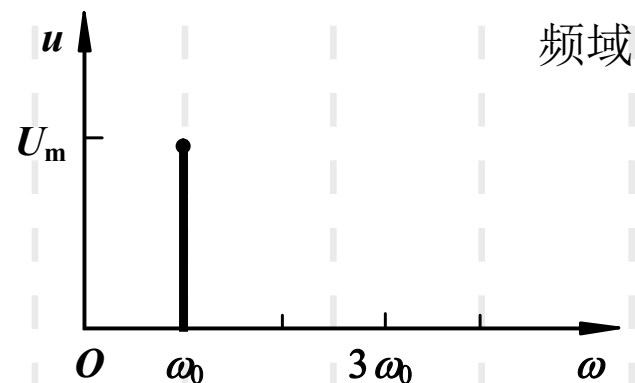
$$u(t) = U_m \sin(\omega_0 t + \theta)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

$$\omega_0 = 2\pi f$$



时域的正弦波信号



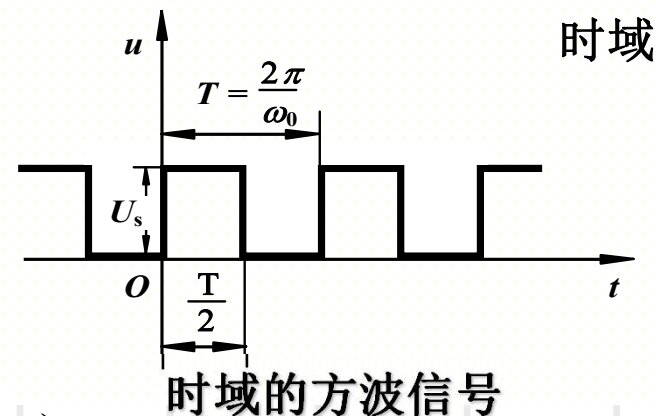
频域的正弦波信号

1、周期信号的频谱

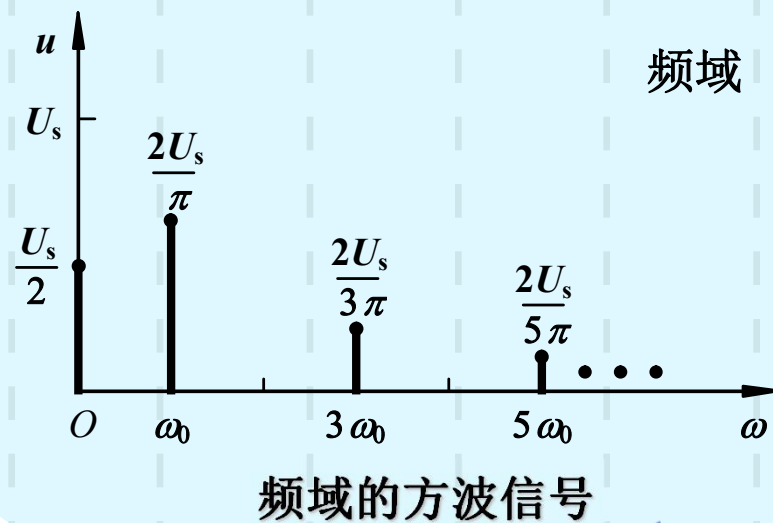
B. 方波信号 (Square Signal)

满足狄利克雷条件，展开成
傅里叶级数

$$u(t) = \frac{U_s}{2} + \frac{2U_s}{\pi} (\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots)$$



频谱：将一个信号分解为正弦信号的集合，得到其正弦信号幅值随角频率变化的分布，称为该信号的频谱。



1、周期信号的频谱

周期信号可以展开为傅里叶级数的三角形式

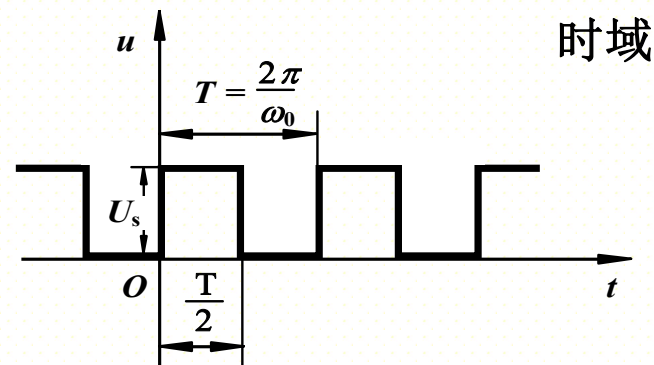
$$U(t) = \sum a_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) , \quad n=1, 2, 3...$$

基波——频率 $f=f_1$ 的正弦波称为基波。

n 次谐波——频率 $f=f_n$ 的正弦波称为 n 次谐波。即 $n=2, 3, 4, \dots$ 分别对应二次、三次、四次谐波。

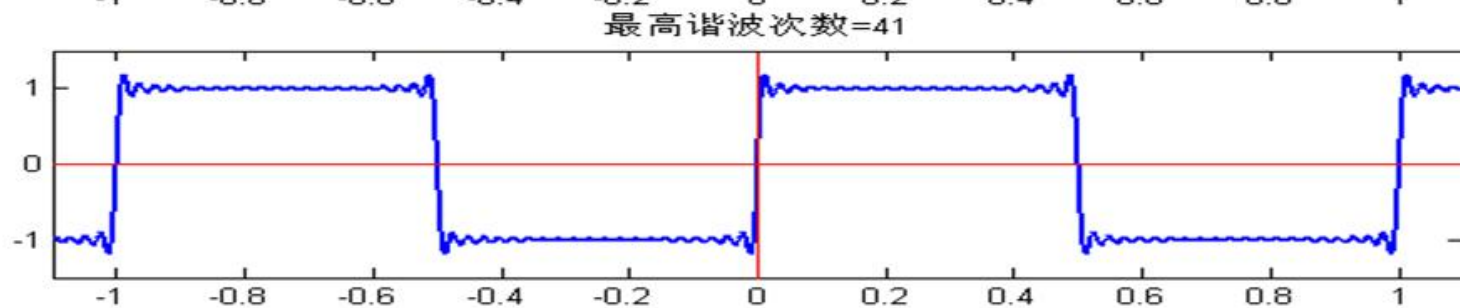
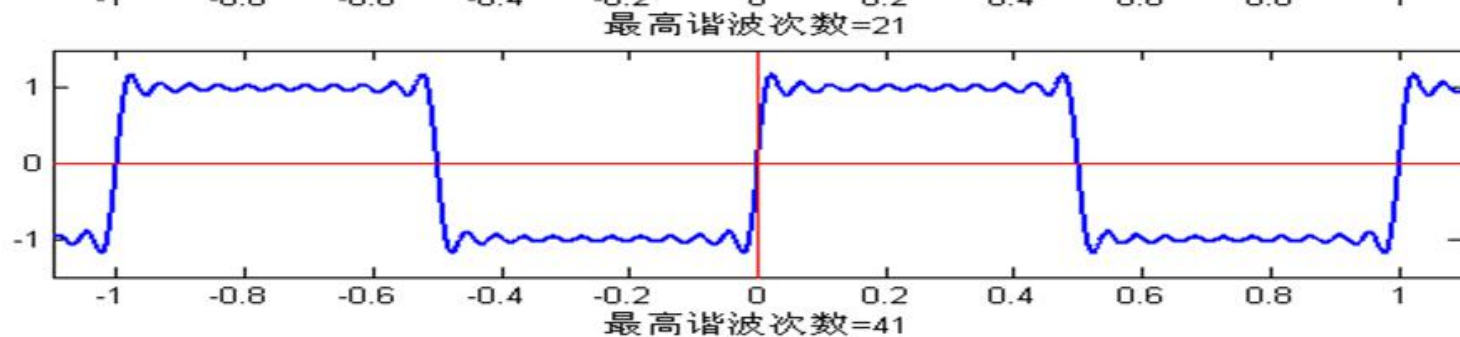
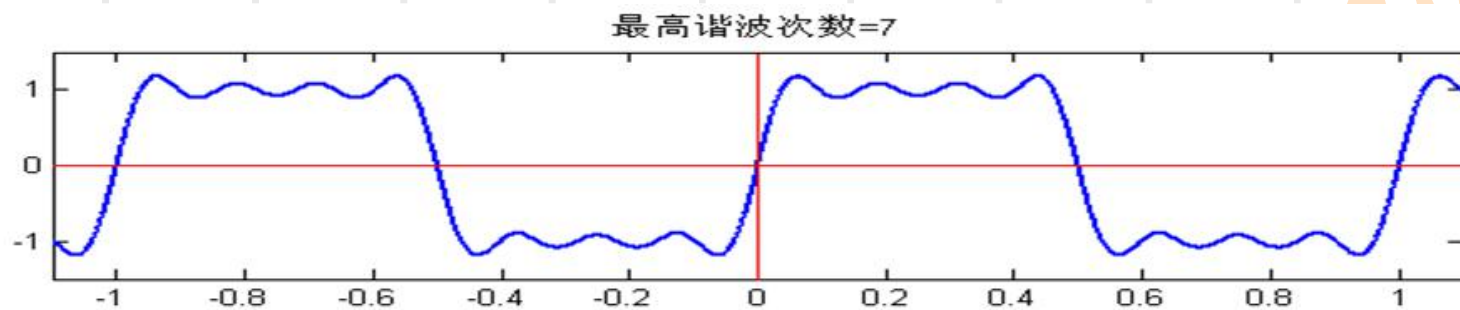
方波信号 (**Square Signal**)

$$u(t) = \frac{U_s}{2} + \frac{2U_s}{\pi} (\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots)$$



时域的方波信号

1、周期信号的频谱



Matlab编程求傅里叶级数的部分和

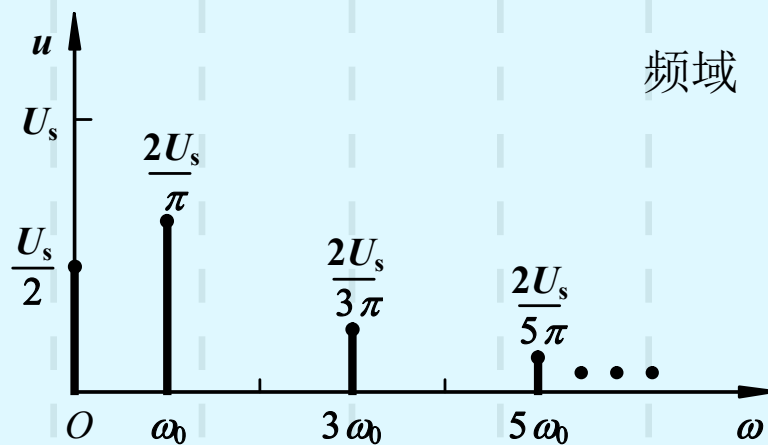
1、周期信号的频谱

周期信号频谱的特点

离散性

谐波性

收敛性



频域的方波信号

2、非周期信号的频谱

C、非周期信号

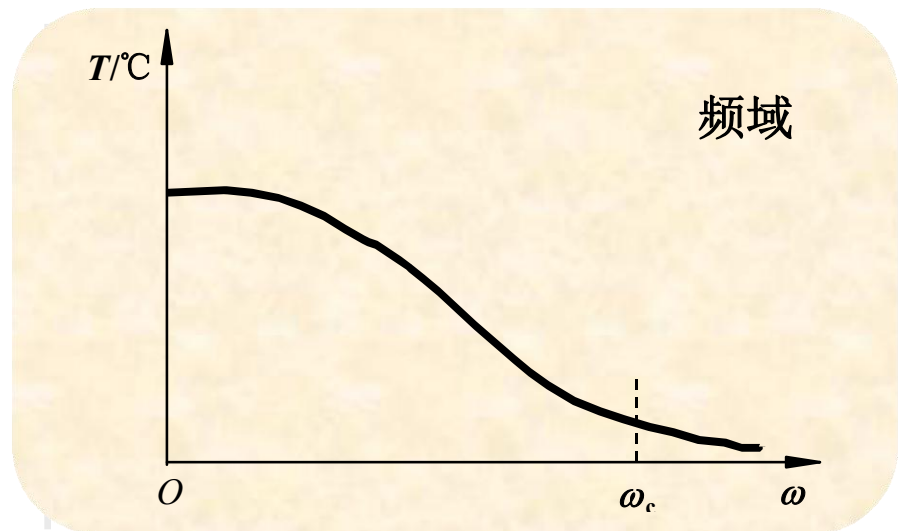
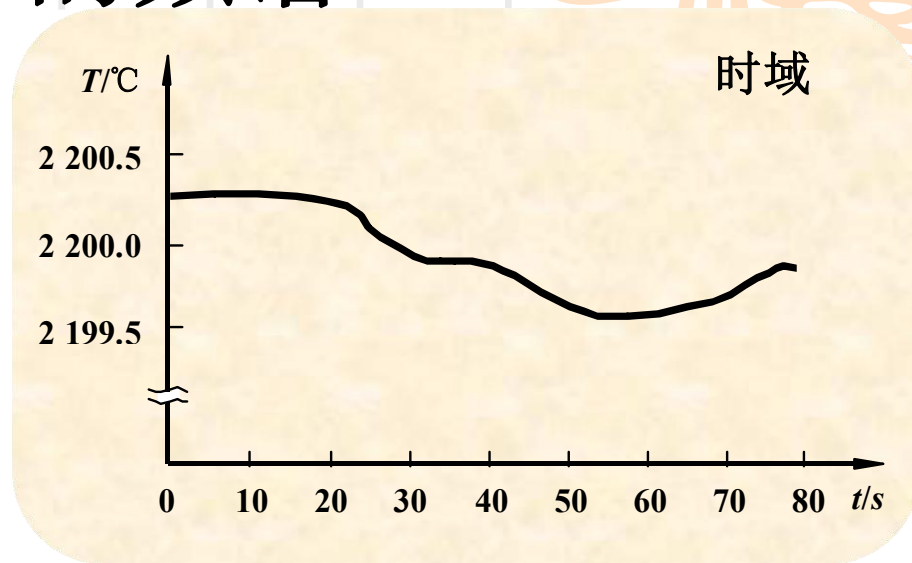
傅里叶变换：

周期信号 $\longrightarrow$ 离散频率函数

非周期信号 $\longrightarrow$ 连续频率函数

非周期信号包含了所有可能的频率成分 ($0 \leq \omega < \infty$)

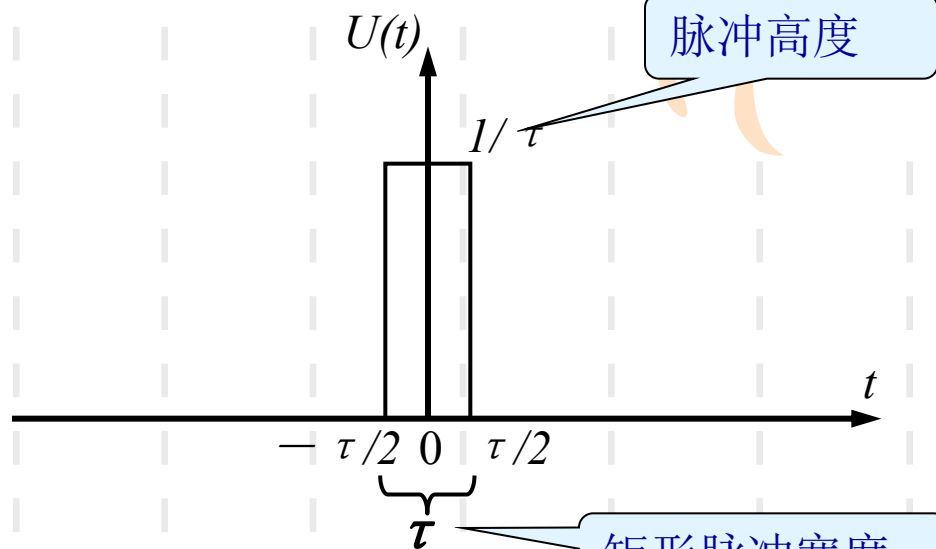
通过快速傅里叶变换 (FFT)
可迅速求出非周期信号的频谱函数。



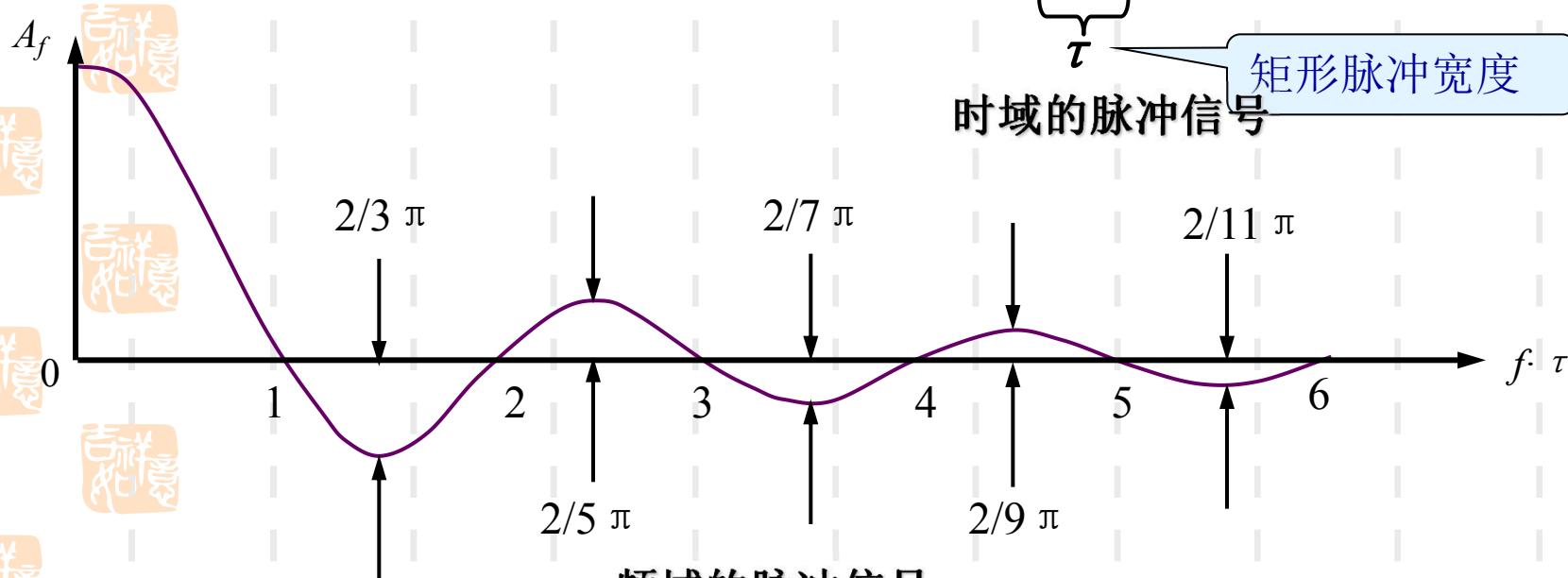
2、非周期信号的频谱

脉冲信号(Pulsing Signal)

单个孤立的波形可以用一系列正弦波的叠加来组成，频率取连续值，且具有连续频谱。

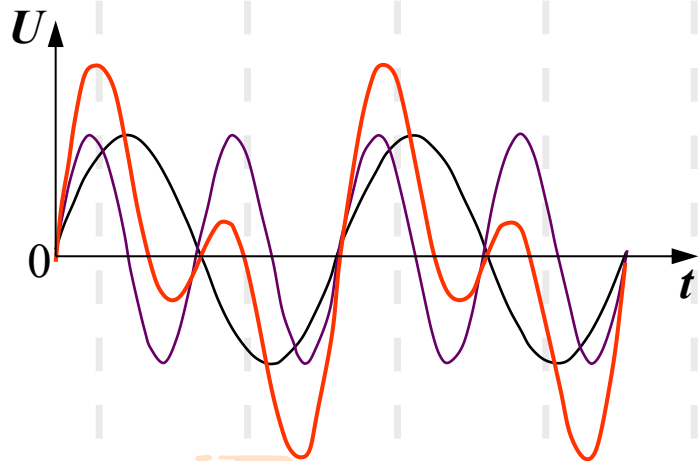


时域的脉冲信号

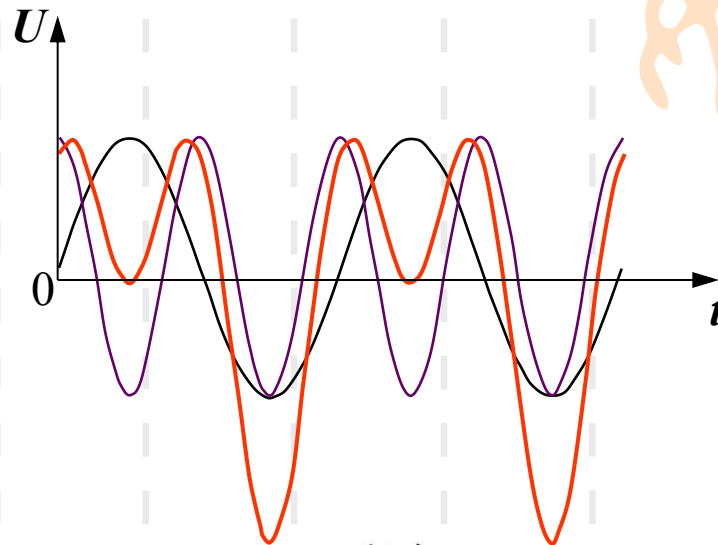


频域的脉冲信号

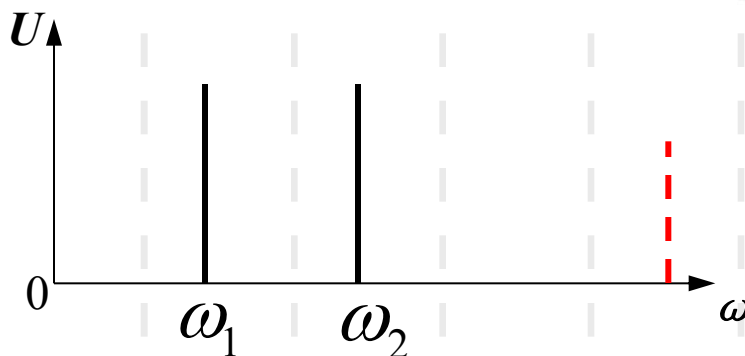
信号的叠加



(a)



(b)



(c)

具有两个频率成分的波

(a) (b) 频率相等相位不同的两个波的时域叠加

(c) 频域表示

第二节 负反馈放大器

一、反馈的基本概念

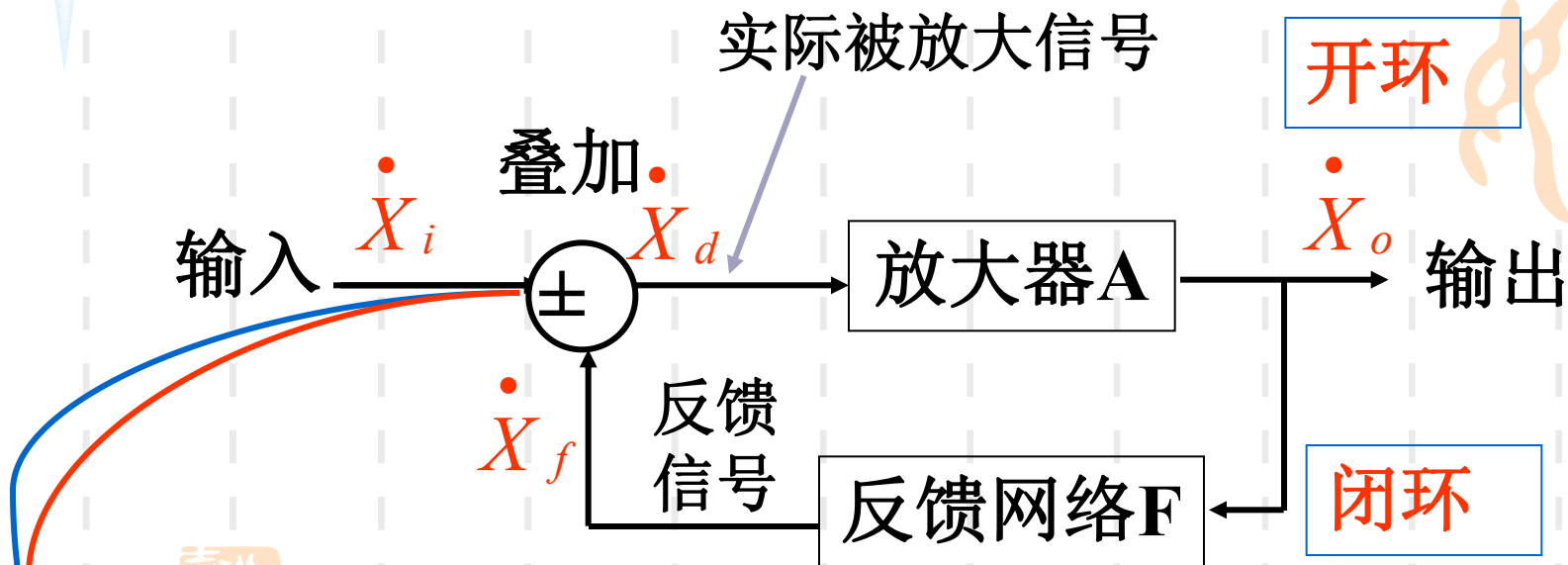
(一) 反馈的定义

凡是将放大电路输出端的信号（电压或电流）的一部分或全部引回到输入端，与输入信号迭加，就称为反馈（*feed back*）。

要点：

- (1) 反馈放大器由基本放大电路和反馈网络两部分组成。
- (2) 反馈信号与输入信号在放大器的输入端叠加。

反馈框图：



取+ 加强输入信号 正反馈 用于振荡器

取- 削弱输入信号 负反馈 用于放大器

负反馈的作用： 稳定静态工作点； 稳定放大倍数； 提高输入电阻； 降低输出电阻； 扩展通频带。

(二) 反馈的类型及其判定方法

1. 正反馈和负反馈

正反馈：反馈信号增强了输入信号，就称为正反馈。

负反馈：反馈信号削弱了输入信号，就称为负反馈。

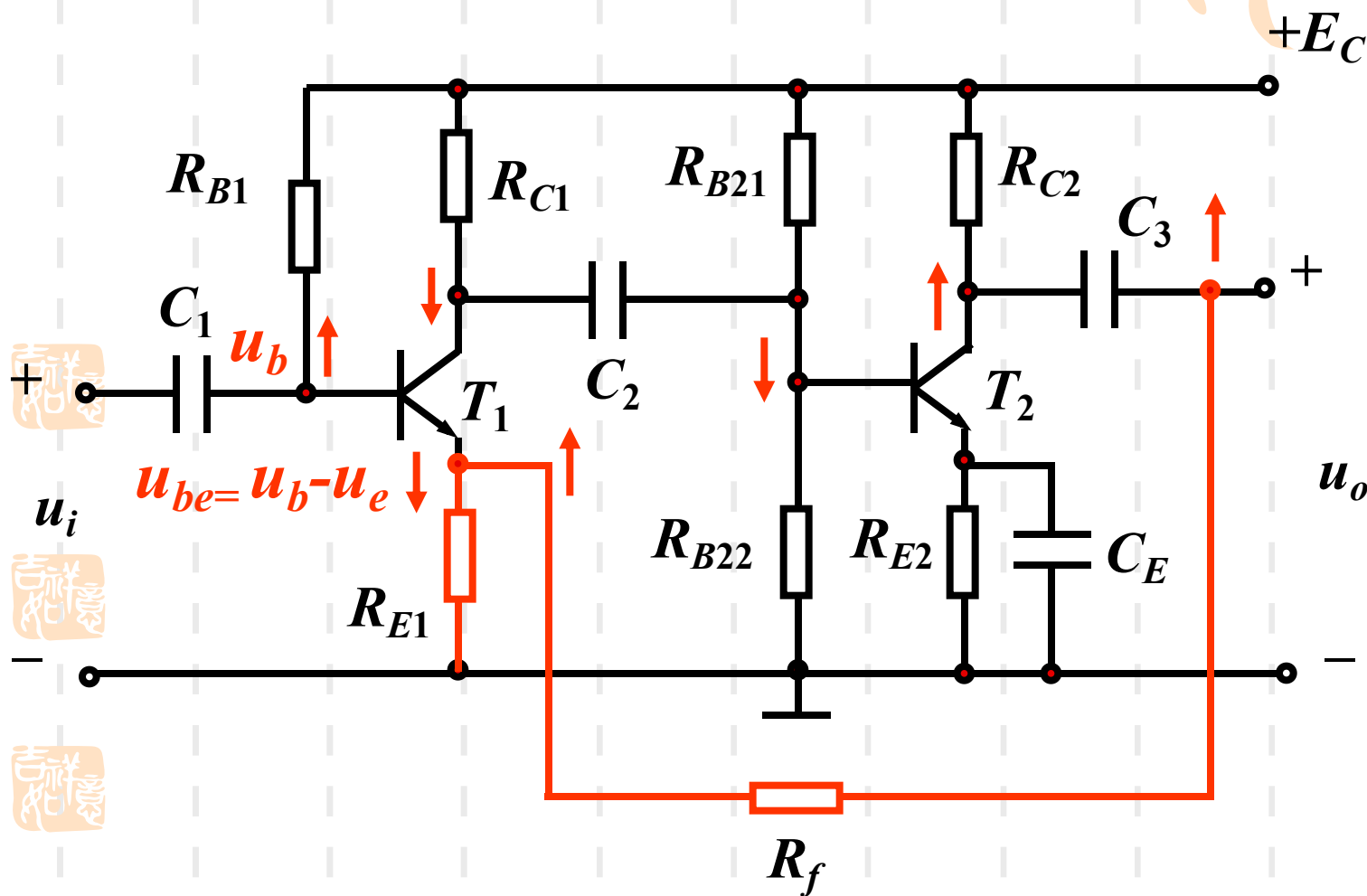
判定方法：采用瞬时极性法。

(1) 在放大器的输入端，假定输入信号电压 u_i 处于某一瞬时极性。如用“+”号。

(2) 按照电压信号传输方向，根据放大器基-射同相，基-集反相原则，判断反馈信号 u_f 瞬时极性。

(3) 如果反馈信号的瞬时极性使净输入减小，则为负反馈；反之为正反馈。

✿ 瞬时极性法用到了三极管的集电极与基极相位相反这一性质。



2. 交流反馈与直流反馈

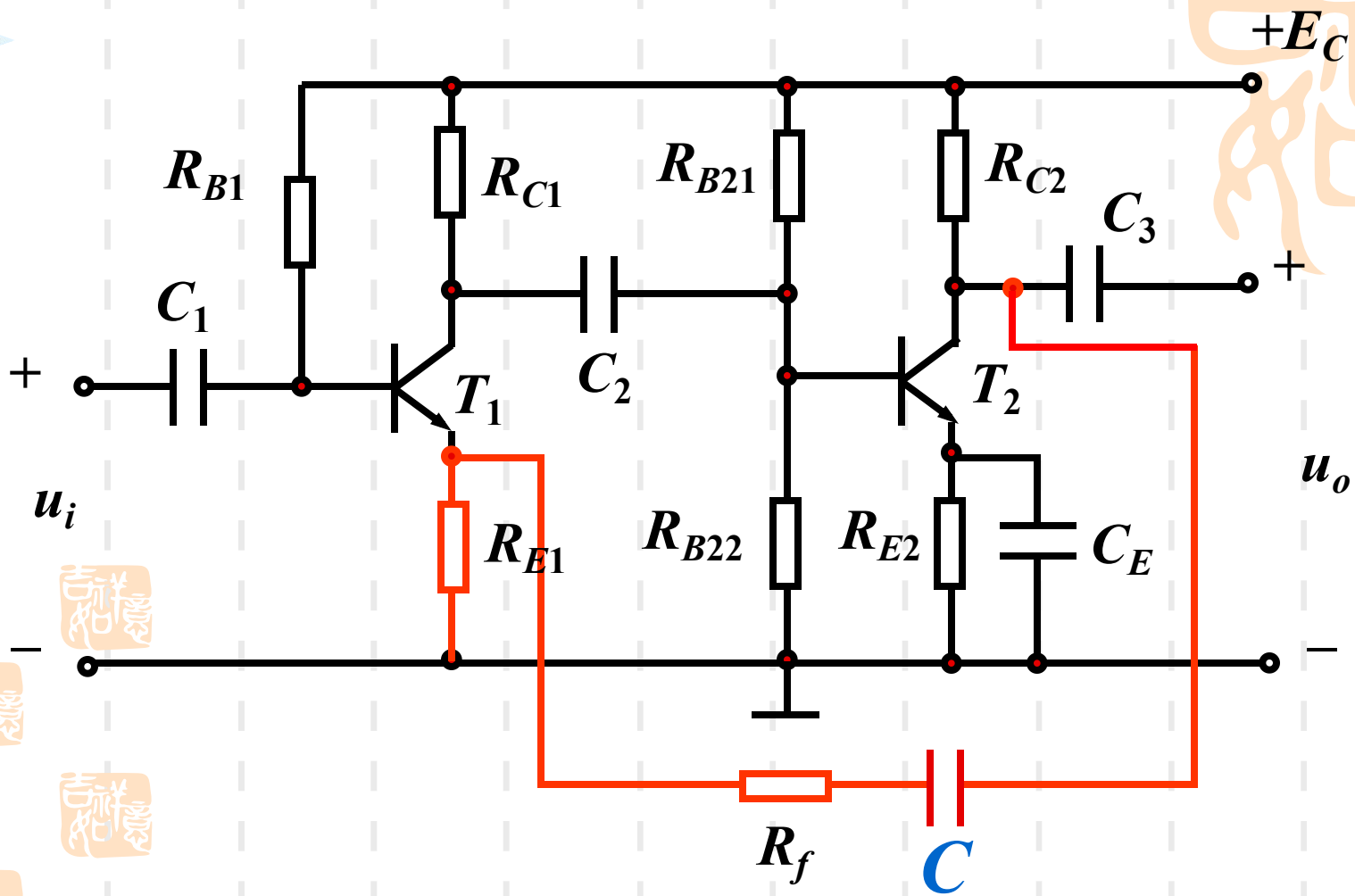
交流反馈：反馈只对交流信号起作用。

直流反馈：反馈只对直流起作用。

判定方法：在直流通路中，如果有反馈存在，则为直流反馈。在交流通路中，如果有反馈存在，则为交流反馈。

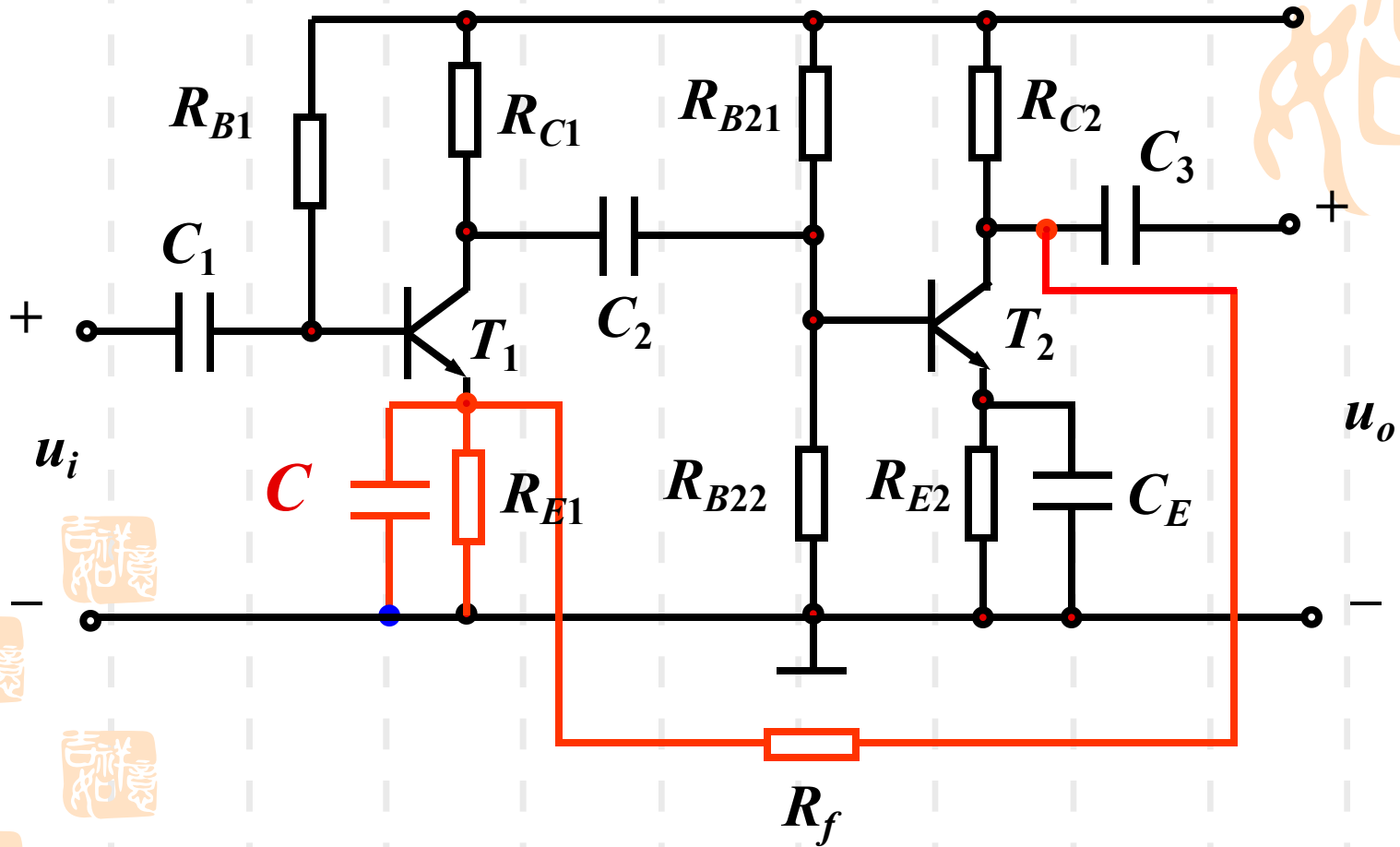
要点：若在反馈网络中串接隔直电容，则可以隔断直流，此时反馈只对交流起作用。

在起反馈作用的电阻两端并联旁路电容，可以使其只对直流起作用。



增加隔直电容 C 后， R_f 只对交流起反馈作用。

注：本电路中 C_1 、 C_2 也起到隔直作用。



增加旁路电容 C 后， R_f 只对直流起反馈作用。

3. 电压反馈和电流反馈

根据反馈所采样的信号不同，可以分为电压反馈和电流反馈。

电压反馈：反馈信号取自输出电压信号。

电流反馈：反馈信号取自输出电流信号。

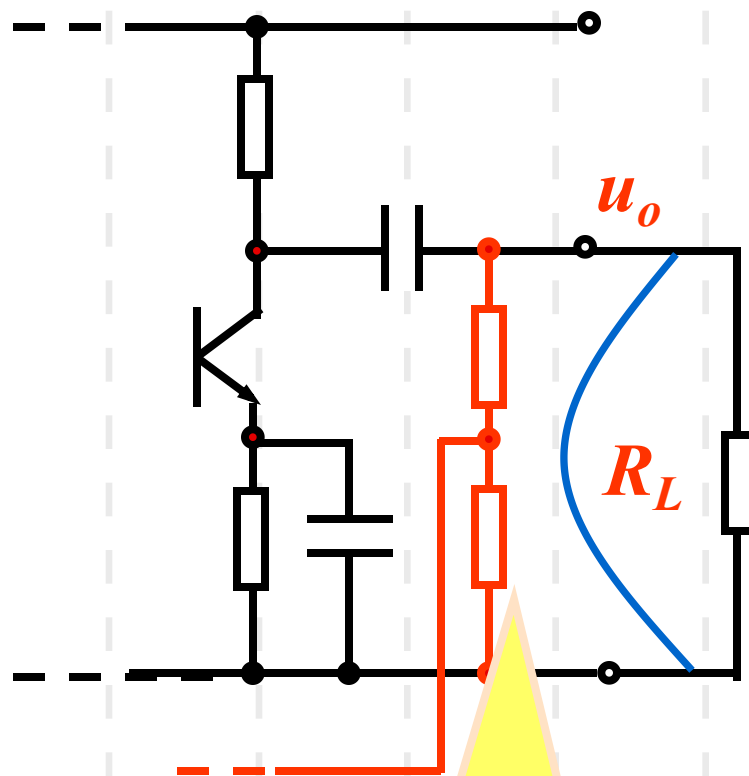
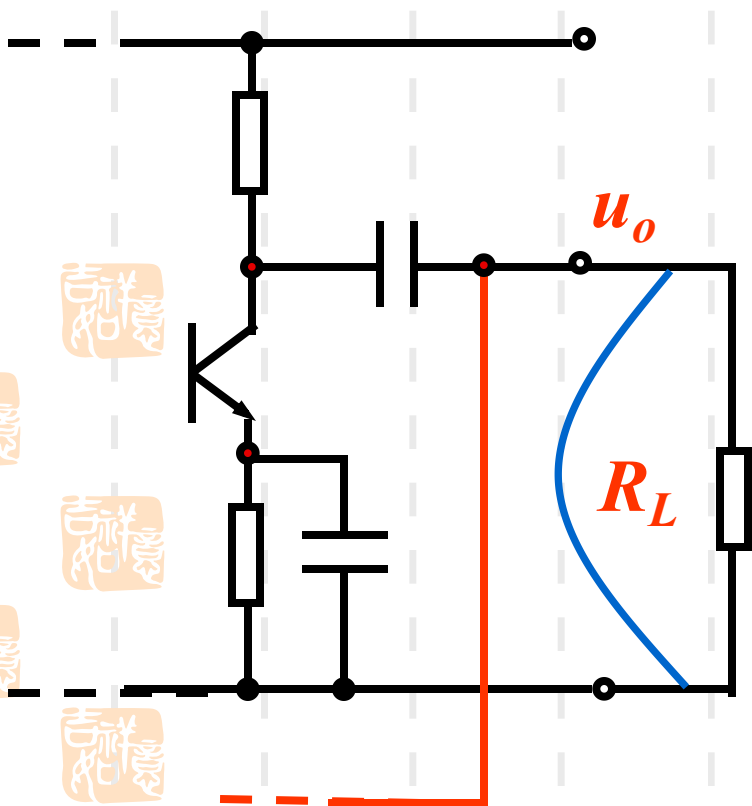
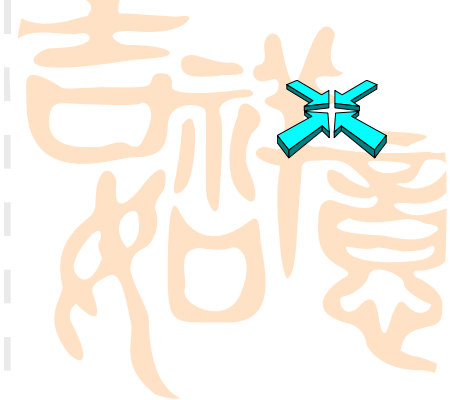
电压负反馈可以稳定输出电压、减小输出电阻。

电流负反馈可以稳定输出电流、增大输出电阻。

判定方法：当输出电压短路 $u_o = 0$ ，若反馈消失为电压反馈，反之则为电流反馈。

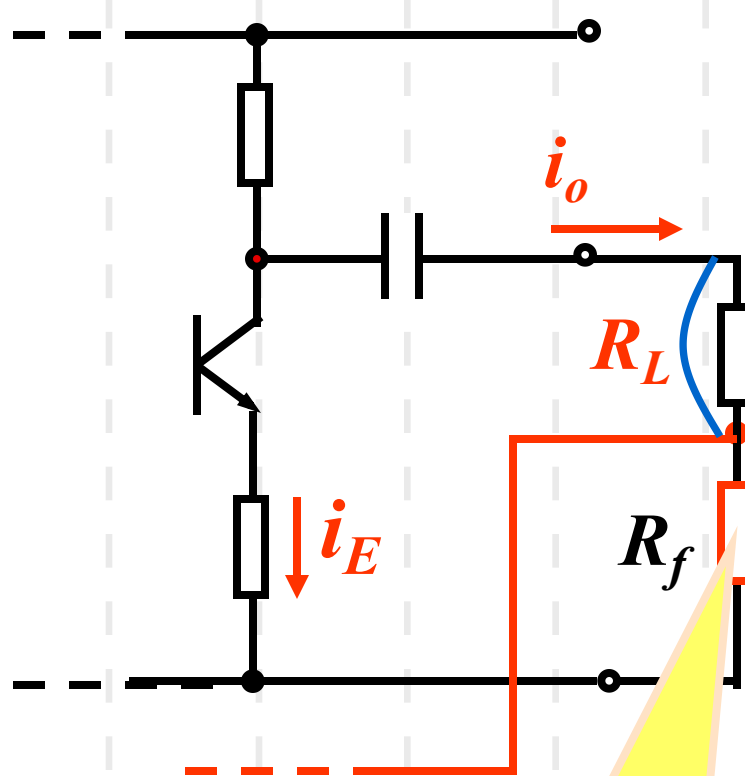
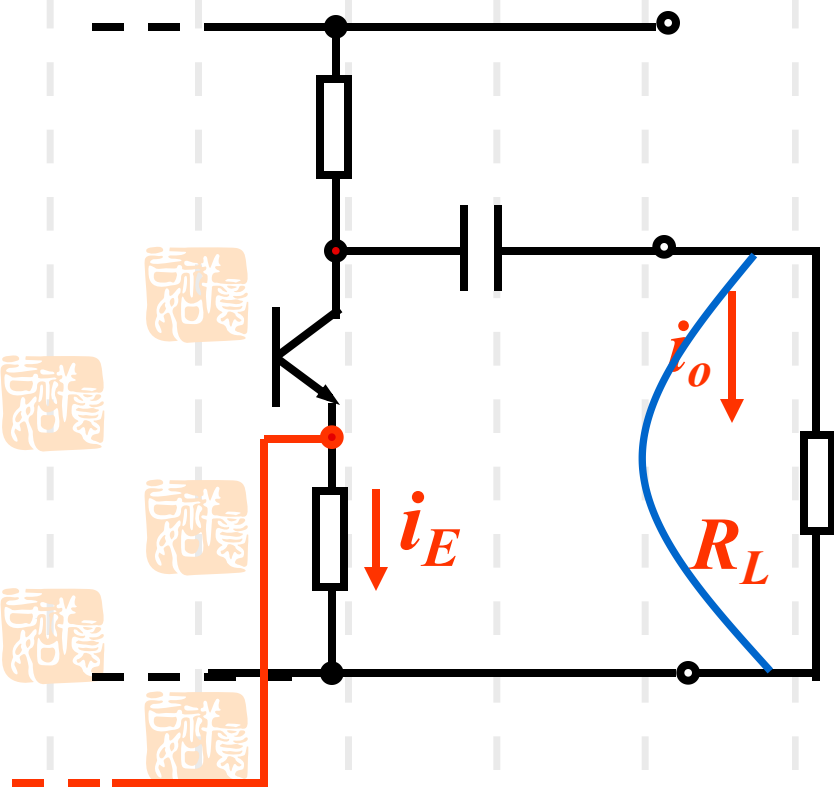


电压反馈采样的两种形式:



采样电阻很大

电流反馈采样的两种形式：



采样电阻很小

4. 串联反馈和并联反馈

根据反馈信号在输入端与输入信号比较形式的不同，可以分为**串联反馈**和**并联反馈**。

串联反馈：反馈信号与输入信号在输入回路中以电压的形式相加减。

并联反馈：反馈信号与输入信号在输入回路以电流形式相加减。

判定方法：如输入信号 X_i 与反馈信号 X_f 在输入回路的不同端点，则为串联反馈。

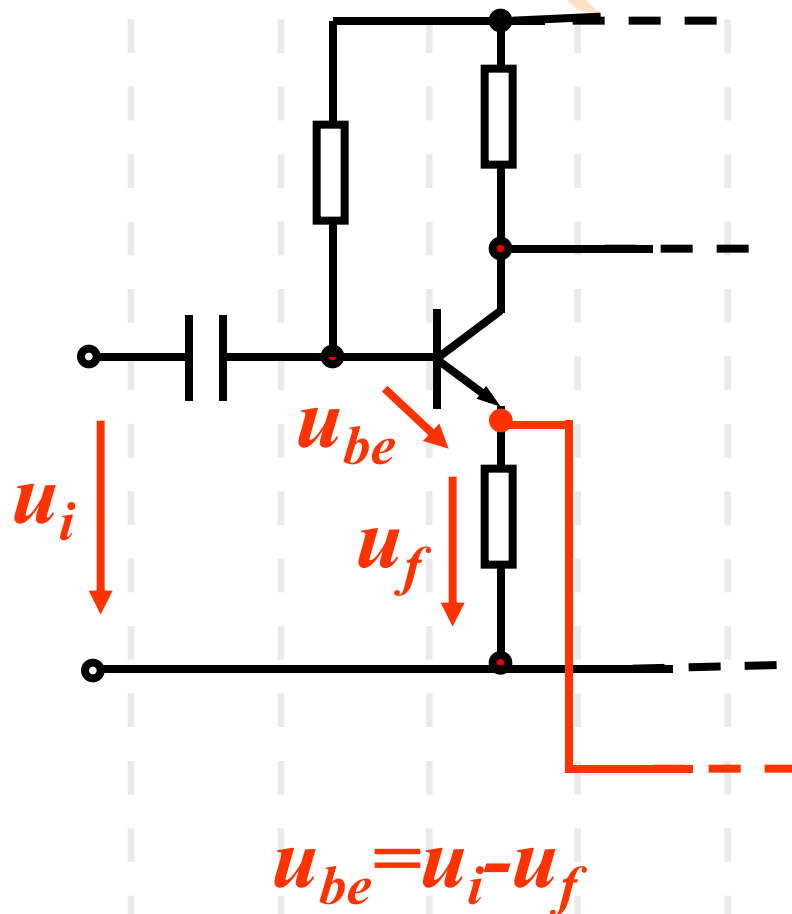
如输入信号 X_i 与反馈信号 X_f 在输入回路的相同端点，则为并联反馈。

串联反馈：反馈信号与输入信号串联，即反馈电压信号与输入信号电压比较。



反馈到发射极
为串联反馈

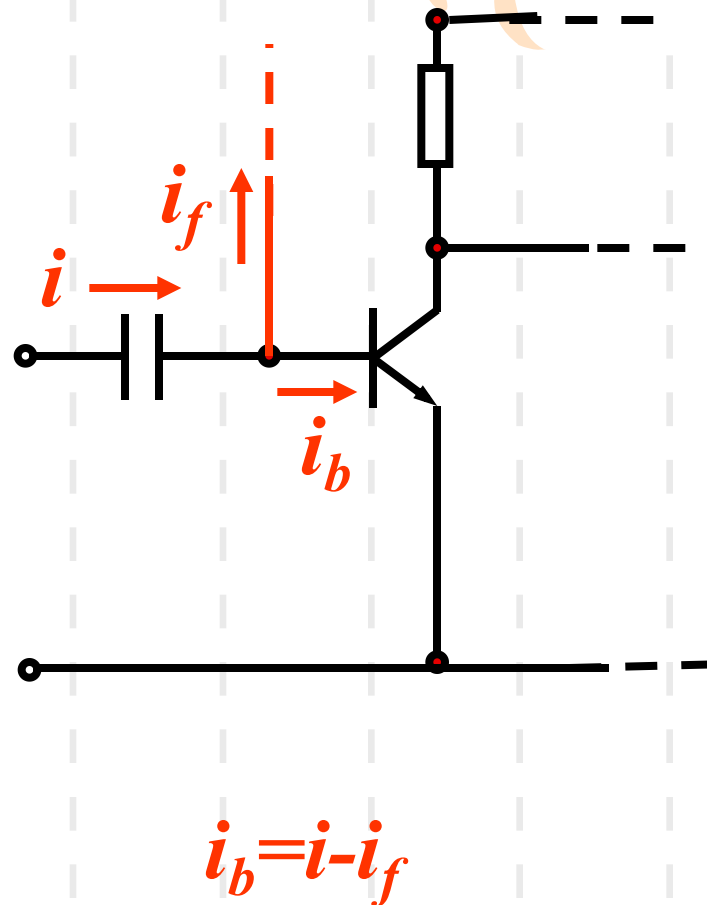
串联反馈使电路
的输入电阻增大



并联反馈：反馈信号与输入信号并联，即反馈信号
电流与输入信号电流比较。

反馈到基极
为并联反馈

并联反馈使
电路的输入电阻
减小。



二、负反馈的基本类型

正反馈

负反馈

交流反馈

直流反馈

电压反馈

电流反馈

串联反馈

并联反馈

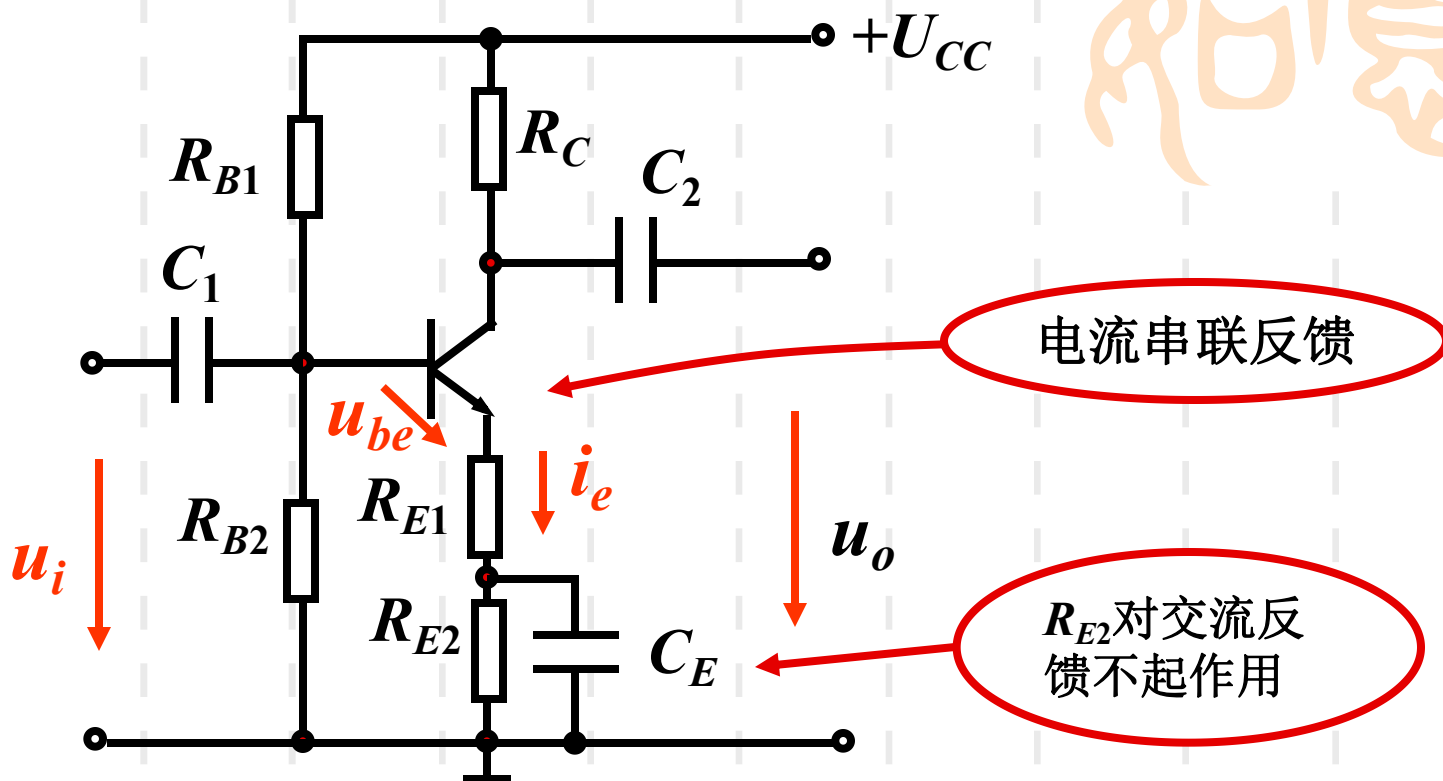
电压串联负反馈

电压并联负反馈

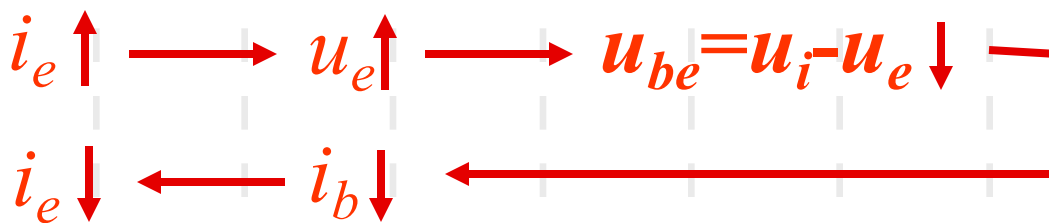
电流串联负反馈

电流并联负反馈

例1: 判断如图电路中 R_{E1} 、 R_{E2} 的负反馈作用。



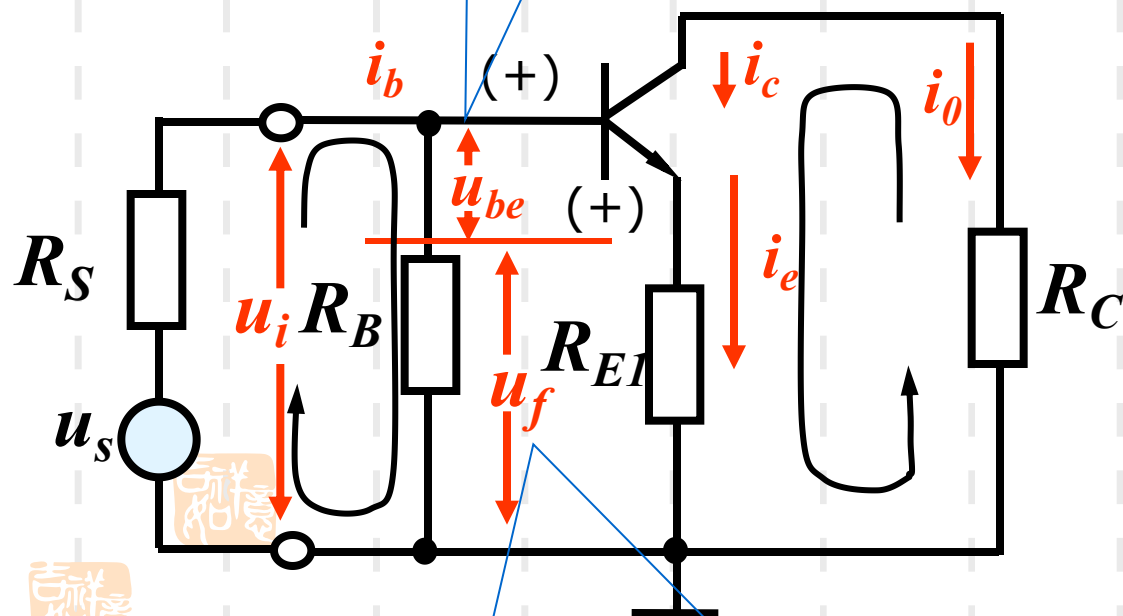
对交流信号:



R_{E1} : 负反馈。

交流通路

$$u_{be} = u_i - u_f$$



$$u_f = i_e R_e \approx -i_o R_e$$

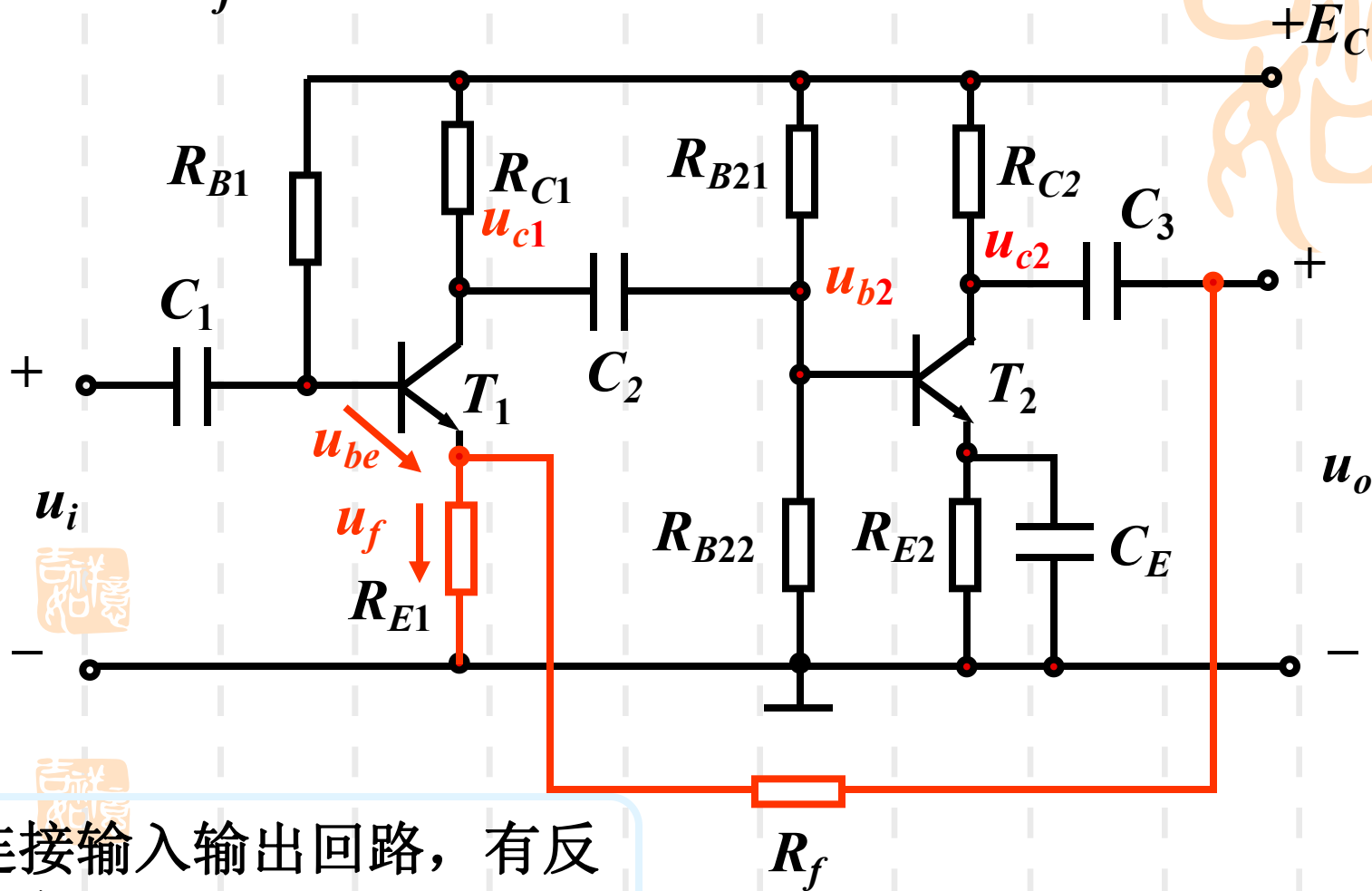
R_e 介于输入输出回路之间，有反馈存在。

在输入回路中，反馈信号 u_f 与 u_i 串联，净输入电压 $u_{be} = u_i - u_f$ ，属串联负反馈。

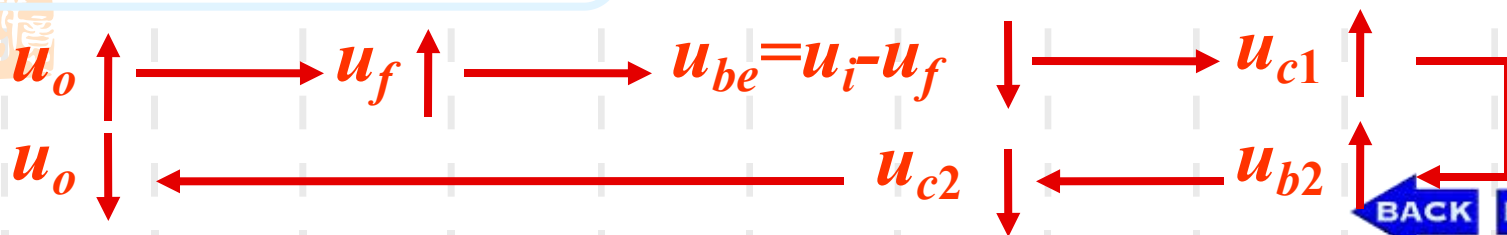
u_f 与输出电流 $i_o \approx i_e$ 成比例，即为电流负反馈。

电流反馈的重要特点是维持输出电流的恒定，使放大器的输出电阻增加。

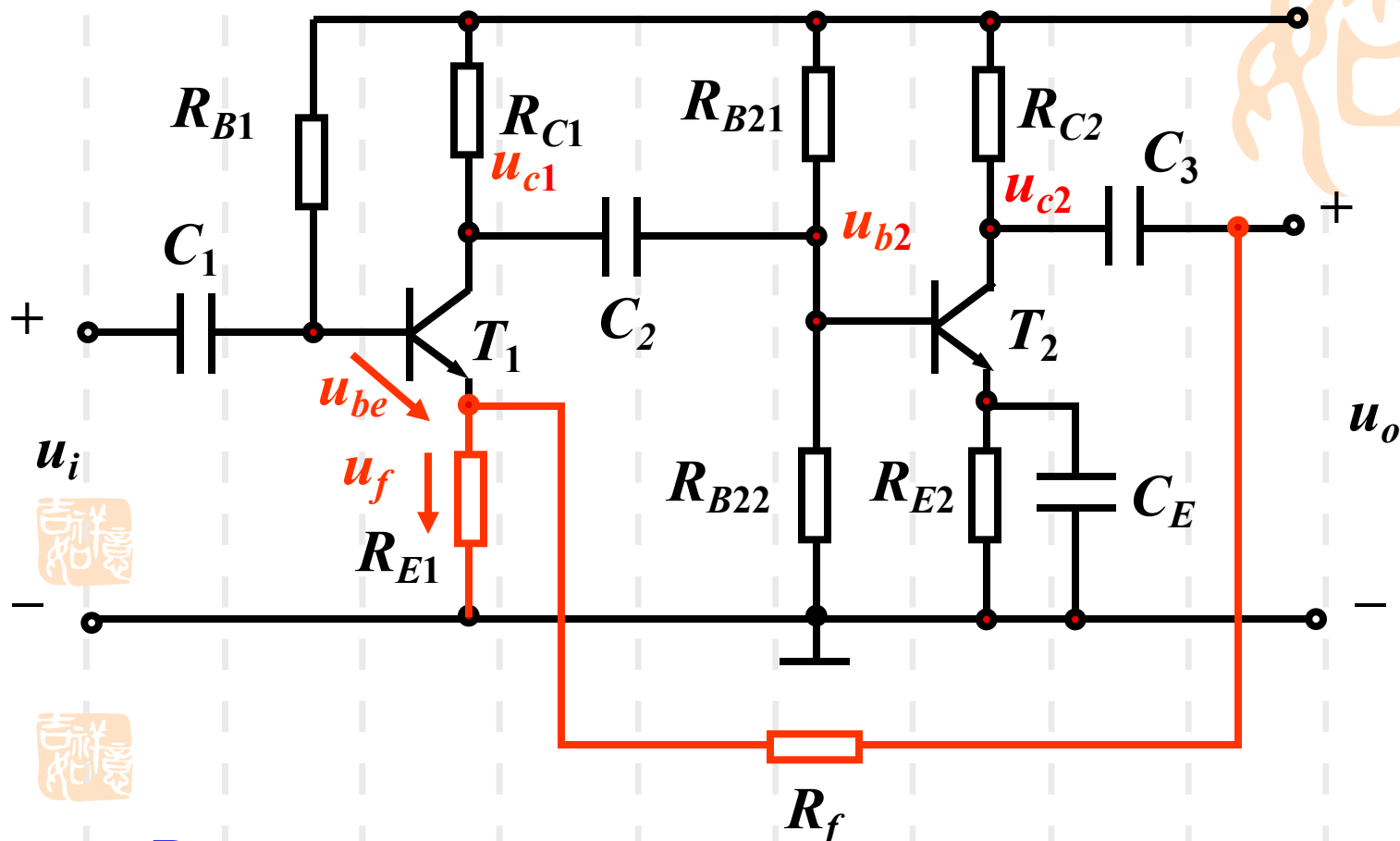
例2: 判断 R_f 是否负反馈, 若是, 判断反馈的组态。



R_f 连接输入输出回路, 有反馈存在



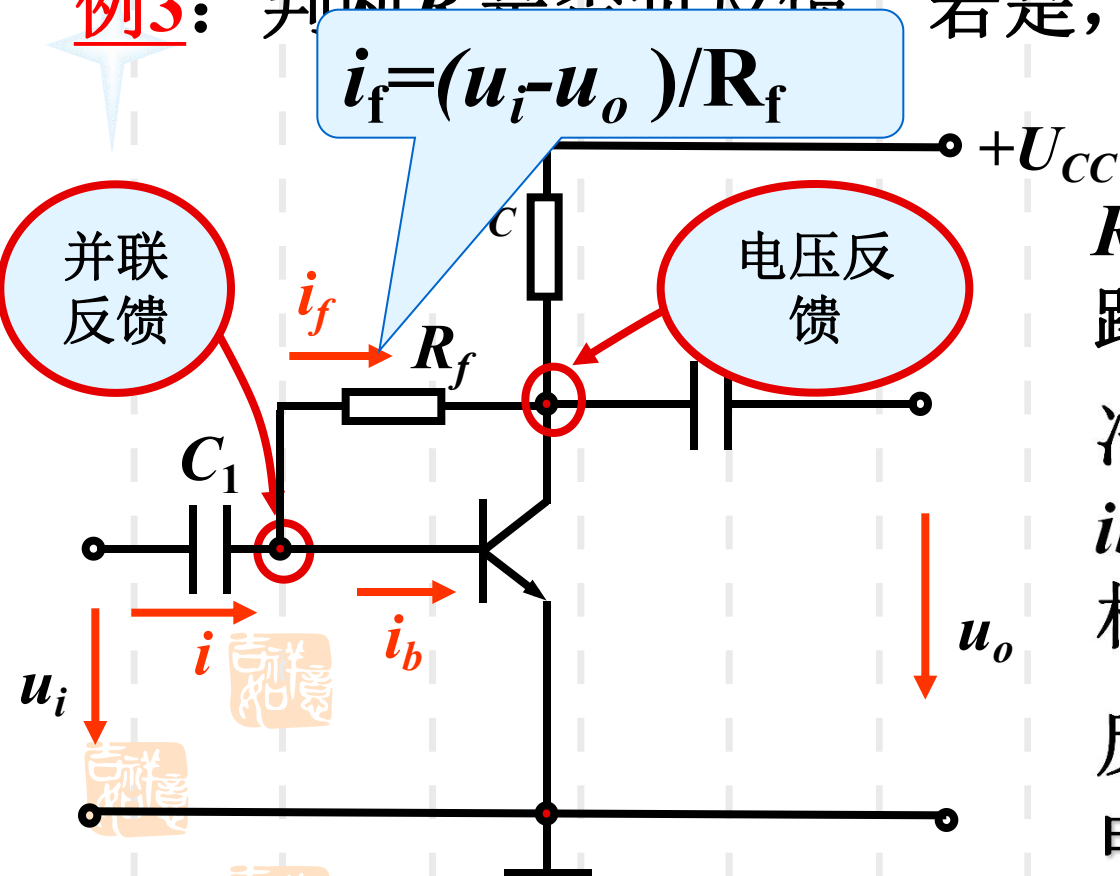
例2：判断 R_f 是否负反馈，若是，判断反馈的组态。



$$u_f = \frac{R_{E1}}{R_{E1} + R_f} u_o$$

反馈电压取自于输出电压，为电压反馈。

例3: 判断 D 是否负反馈 若是, 判断反馈的组态。✖



R_F 为输出与输入联系支路, 因此有反馈存在。

净输入信号为:

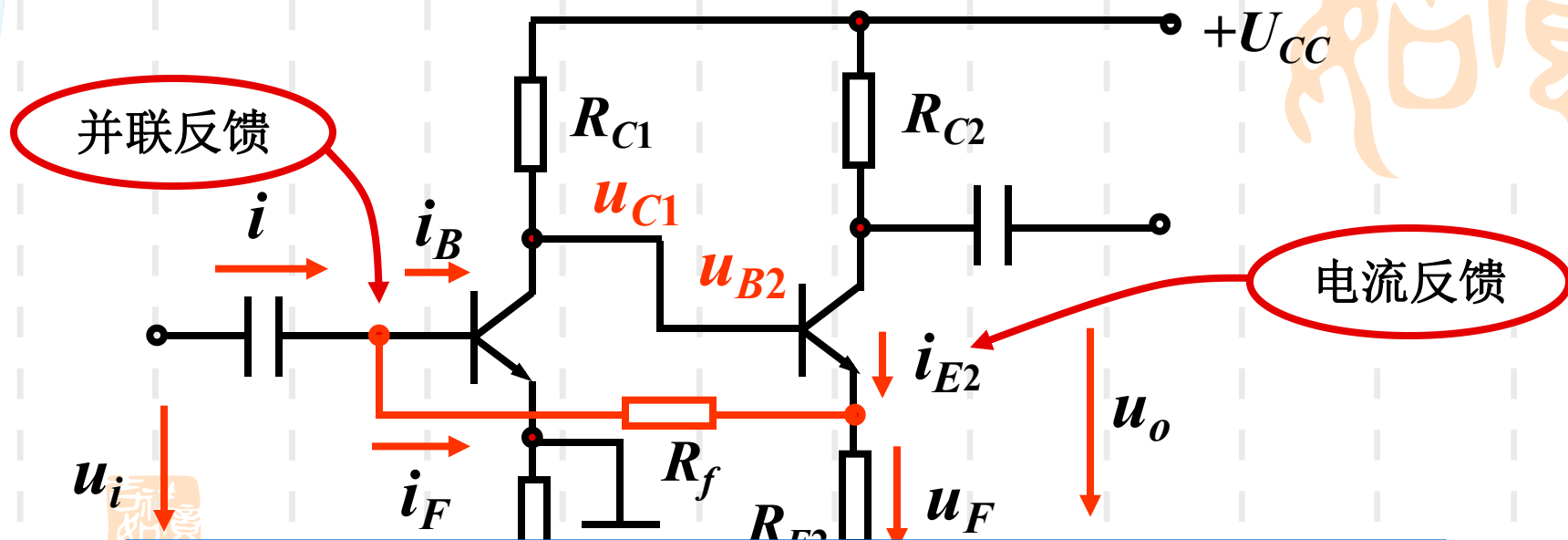
$i_b = i_i - i_f$, 以电流形式相比较, 为并联反馈。

反馈电流取自于输出电压, 为电压反馈。

$u_o \downarrow \rightarrow i_f \uparrow \rightarrow i_b = i_i - i_f \downarrow$ 反馈电流削弱输入电

电压并联负反馈与电压串联负反馈一样都能使放大器的输出电阻减小, 维持输出电压基本恒定。

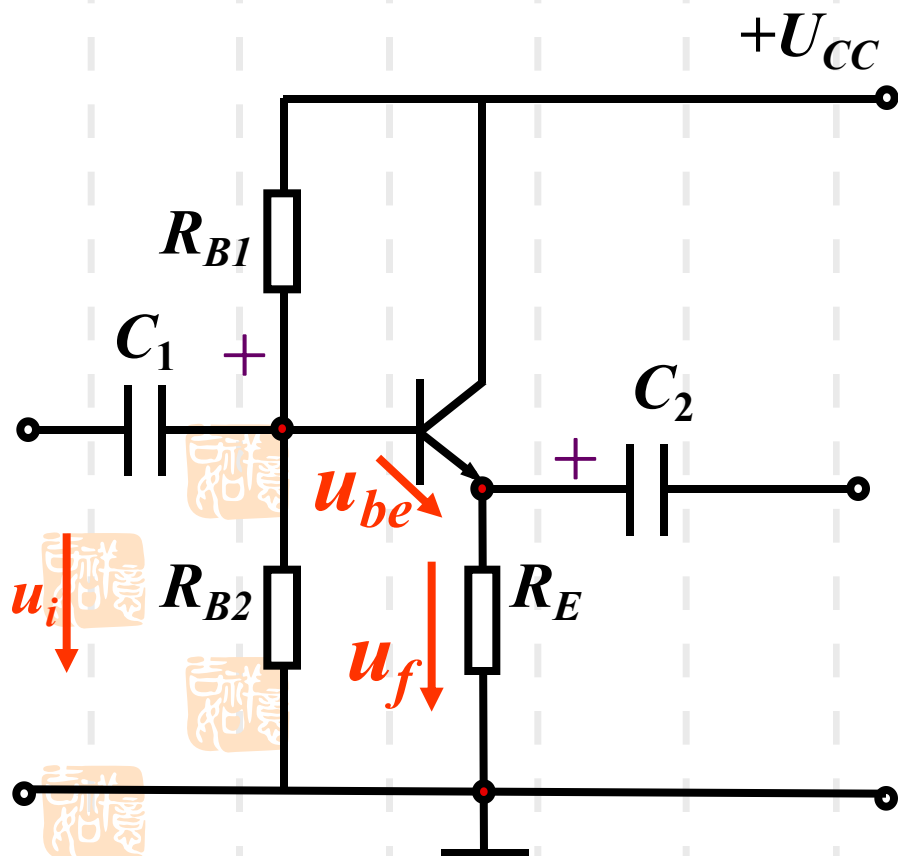
例4: 判断 R_f 是否负反馈, 若是, 判断反馈的组态。✖



并联负反馈使输入阻抗减小。

电流并联负反馈与电流串联负反馈一样都能使放大器的输出电阻增加, 维持输出电流基本恒定。

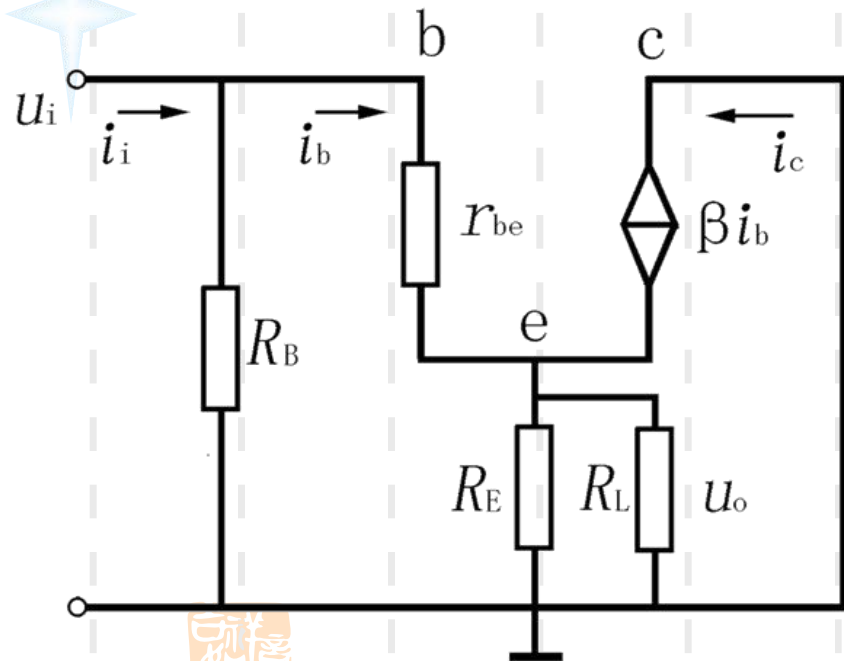
例5: 判断如图所示电路（射随器）反馈的组态。



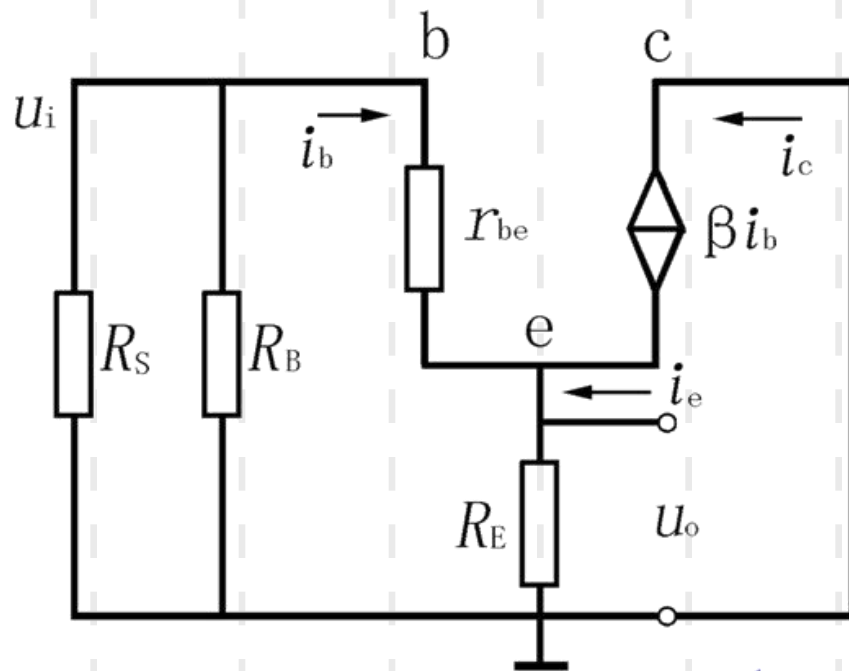
R_E 介于输入输出回路之间，有反馈存在。

从输入端看： $u_{be} = u_i - u_f$ ，以电压形式相加减，故为串联反馈。

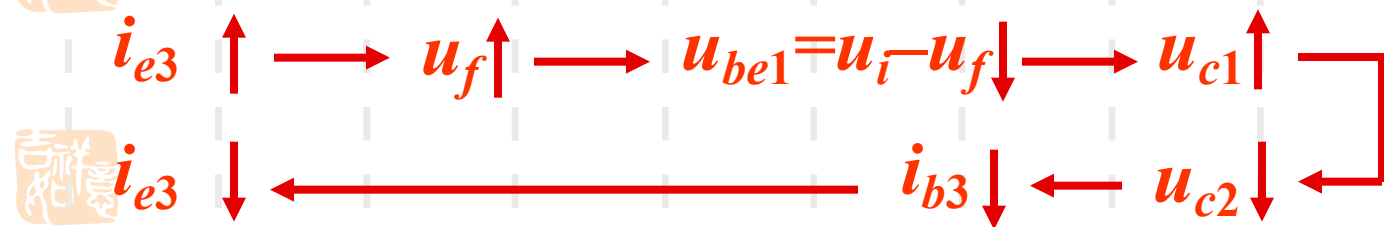
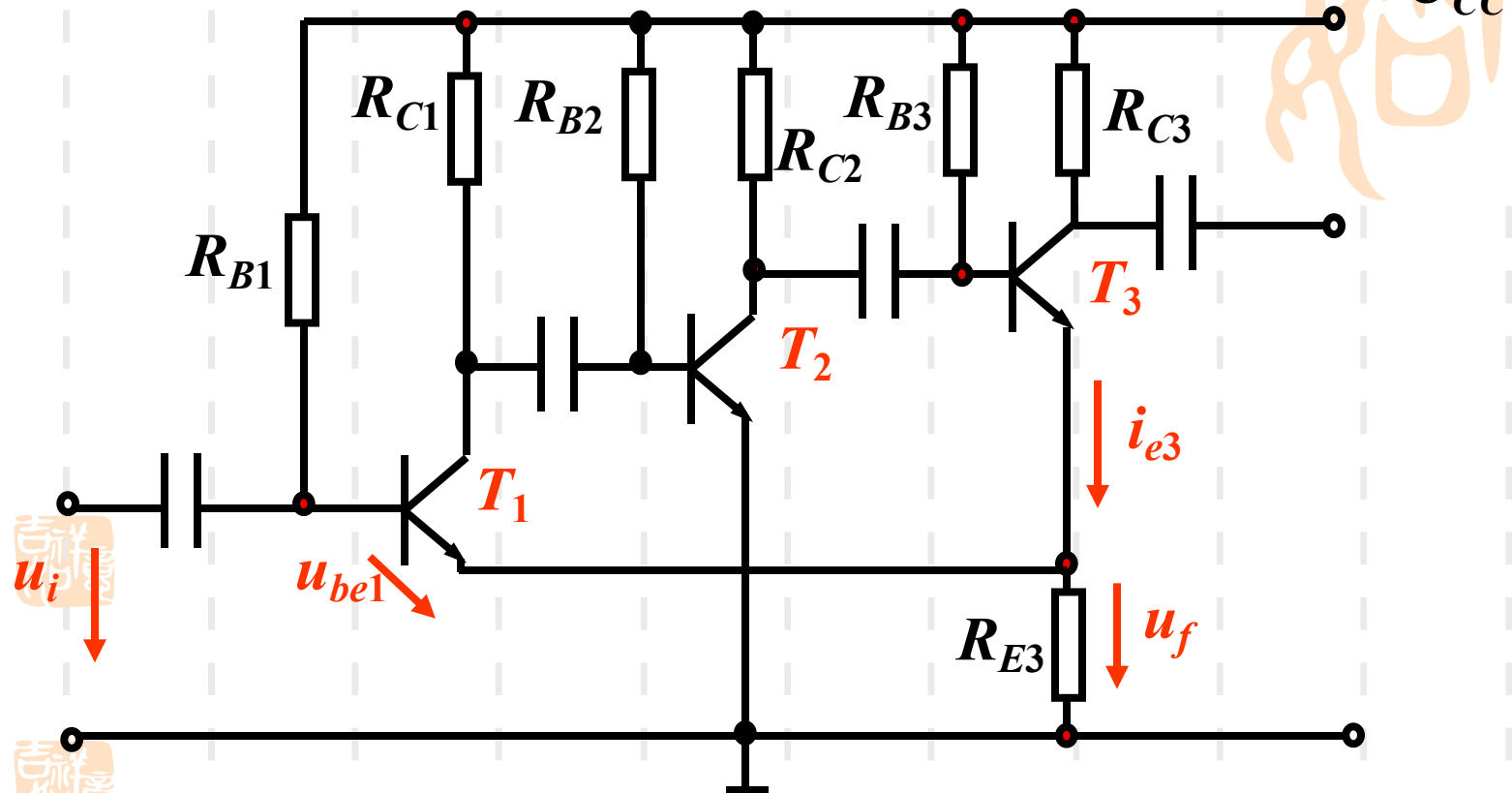
反馈电压 $u_f = u_o$ ，反馈量与输出电压有关，为电压反馈。



反馈电压 $u_f = u_o$ ，反馈量为输出电压。



例6：判断如图电路中 R_{E3} 的负反馈作用。



电流串联负反馈。



电流反馈的重要特点是维持输出电流的恒定。

电压反馈的重要特点是使电路的输出电压基本维持恒定。

串联负反馈使输入电阻增加

并联负反馈使输入电阻减小

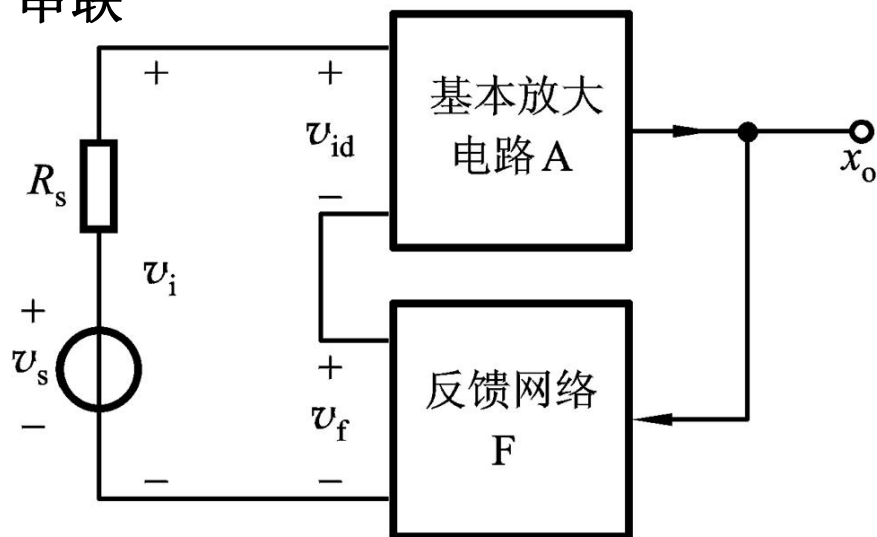
电压负反馈减小输出电阻

电流负反馈增加输出电阻

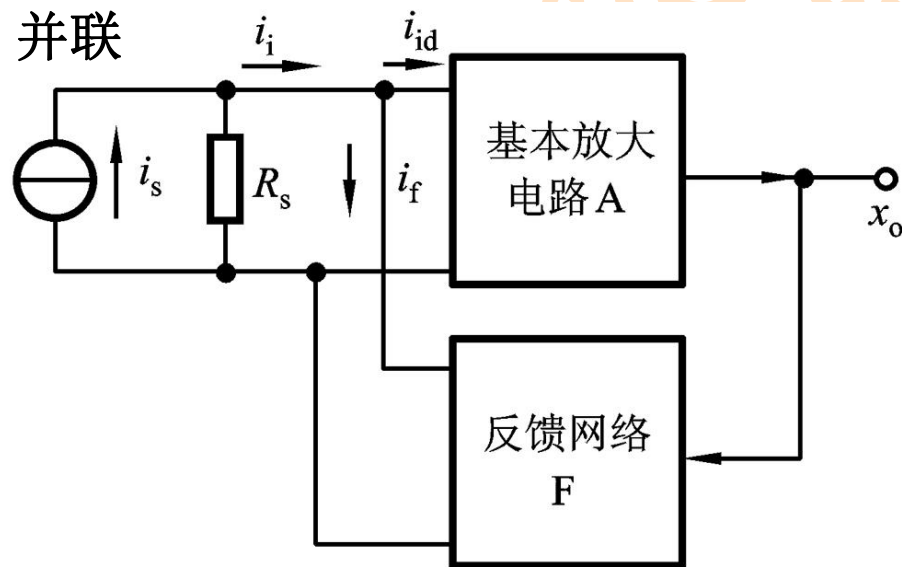
串联反馈与并联反馈

由反馈网络在放大电路输入端的连接方式判定

串联



并联



串联： 输入以电压形式求和 (KVL)

$$-v_i + v_{id} + v_f = 0 \quad \text{即} \quad v_{id} = v_i - v_f$$

并联： 输入以电流形式求和 (KCL)

$$i_i - i_{id} - i_f = 0 \quad \text{即} \quad i_{id} = i_i - i_f$$

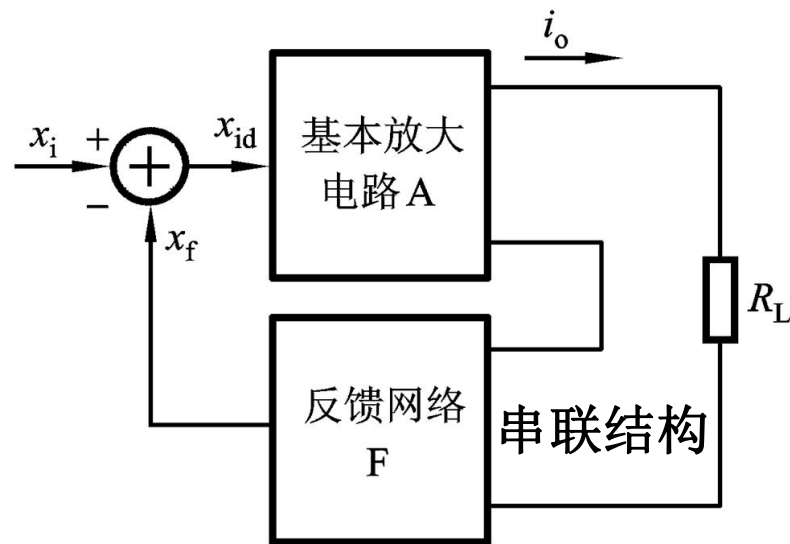
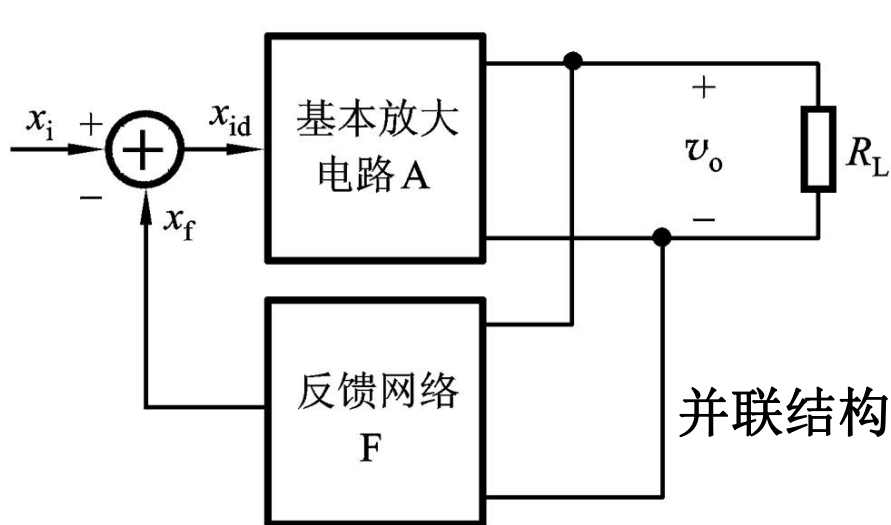
电压反馈与电流反馈



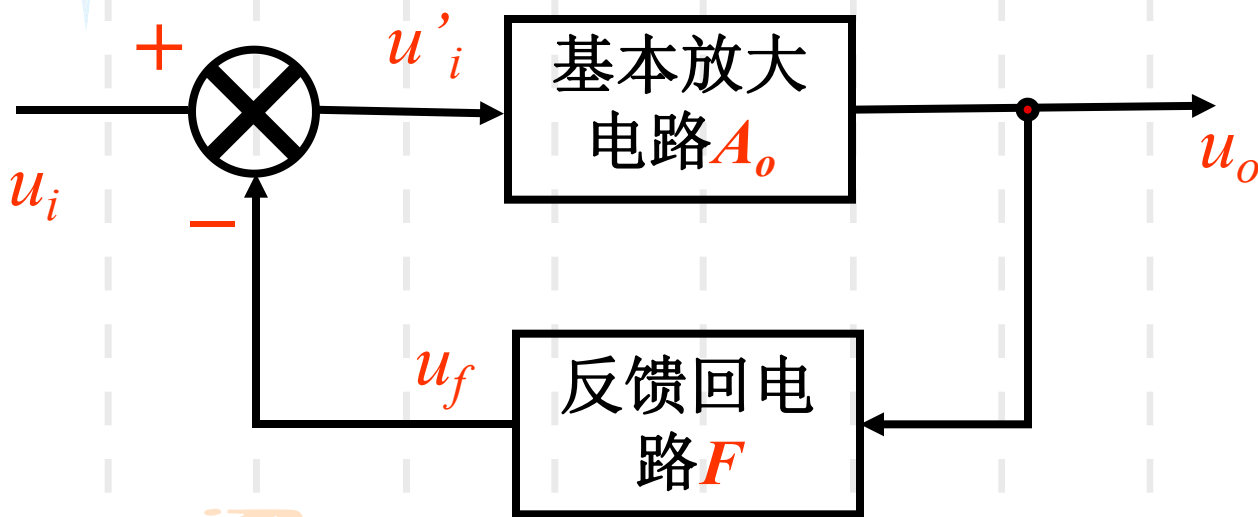
电压反馈与电流反馈由反馈网络在放大电路输出端的取样对象决定

电压反馈：反馈信号 x_f 和输出电压成比例，即 $x_f = Fv_o$

电流反馈：反馈信号 x_f 与输出电流成比例，即 $x_f = Fi_o$



三、负反馈对放大器性能的影响



$$A_o = \frac{u_o}{u_i}$$

——开环放大倍数

$$F = \frac{u_f}{u_o}$$

——反馈系数

$$A_F = \frac{u_o}{u_i}$$

——闭环放大倍数

$$\begin{aligned} A_F &= \frac{u_o}{u_i} \\ &= \frac{u_o}{u_f + u'_i} \\ &= \frac{1}{\frac{u_f}{u_o} + \frac{u'_i}{u_o}} \\ &= \frac{1}{F + \frac{1}{A_o}} \\ &= \frac{A_o}{1 + A_o F} \end{aligned}$$



1、对放大倍数的影响

$$F = \frac{u_f}{u_o}$$

$$A_o = \frac{u_o}{u_i}$$

$$u_i = u_i - u_f$$

$$A_F = \frac{u_o}{u_i} = \frac{A_o}{1 + A_o F}$$

A_o — 开环放大倍数

A_F — 闭环放大倍数

定义： $|1 + A_o F|$ ——— 反馈深度

★ (1) $|1 + A_o F| > 1$ 负反馈使放大倍数下降。

< 1 正反馈使放大倍数上升。

$= 0$ 自激振荡。

闭环时 $A_F = \frac{A}{1 + AF}$

则 $\frac{dA_F}{dA} = \frac{1}{(1 + AF)^2}$

→ $\frac{dA_F}{A_F} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A}$

即闭环增益相对变化量比开环减小了 $1 + AF$ 倍，稳定性提高。



(2) 若 $A_o F \gg 1$ 称为深度负反馈，此时 $A_F = \frac{1}{F}$

在深度负反馈的情况下，放大倍数只与反馈网络有关。当反馈网络由稳定的线性元件组成时，闭环增益将有很高的稳定性。

结论： 引入负反馈使电路的放大倍数下降，但使得电路的稳定性提高。



- 一负反馈电路，如果要求开环放大倍数 A 变化25%时，闭环放大倍数 A_f 的变化不能超过1%，又要求 A_f 大于100，问 A 至少应选多大？ F 应选多大？

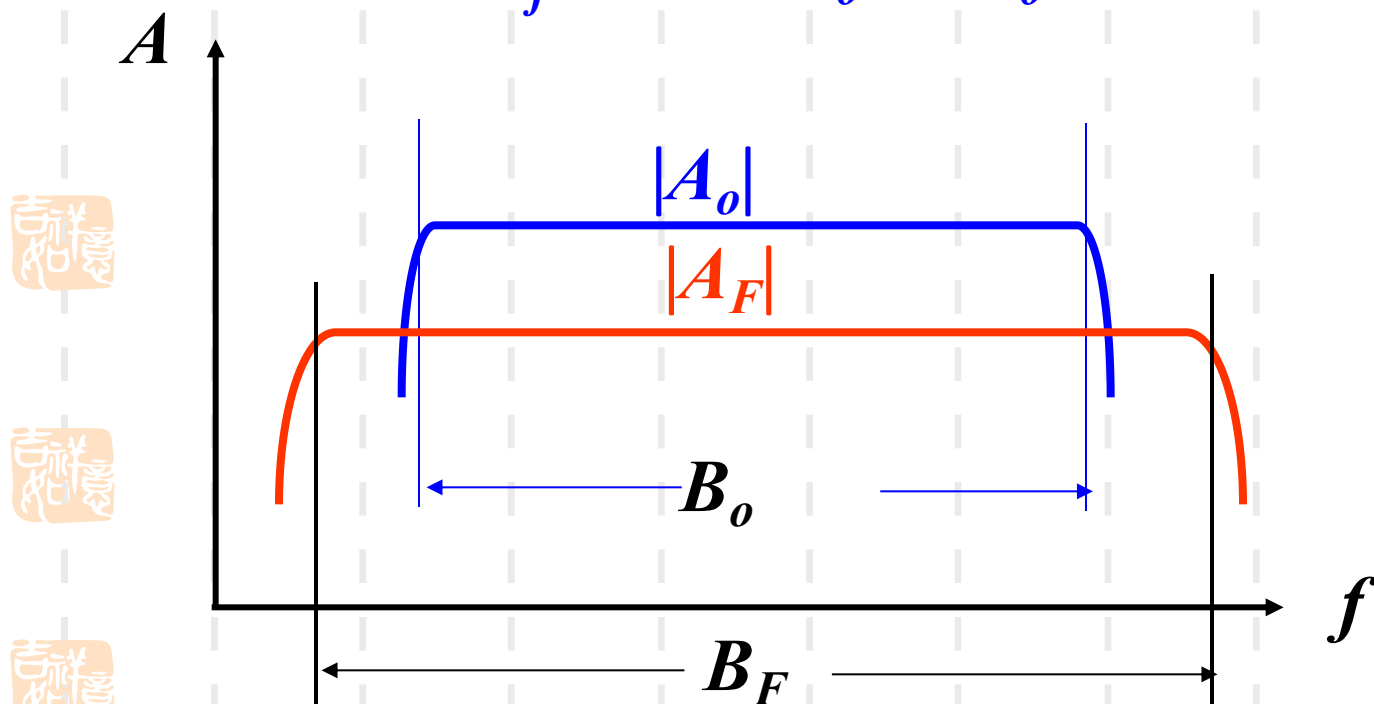
$$\frac{dA_F}{A_F} = \frac{1}{1 + AF} \cdot \frac{dA}{A}$$

$$0.01 = \frac{1}{1 + AF} \cdot 0.25$$

2、对通频带的影响

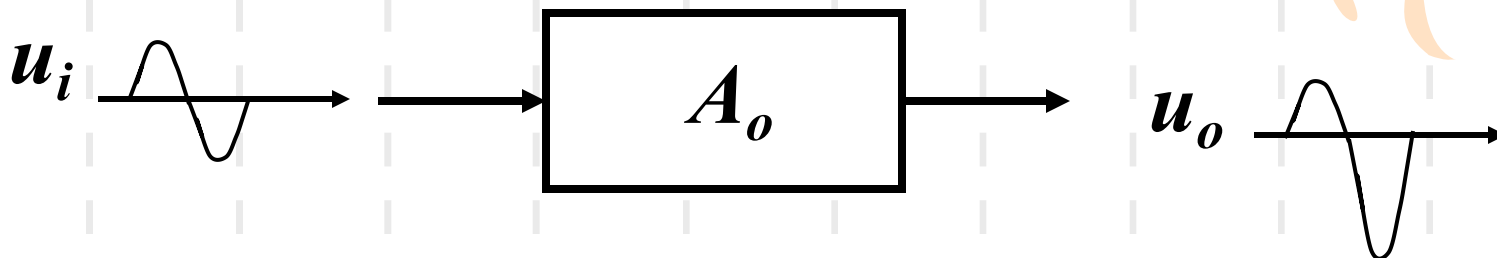
引入负反馈使电路的通频带宽度增加:

$$B_f = (1 + A_o F) B_o$$

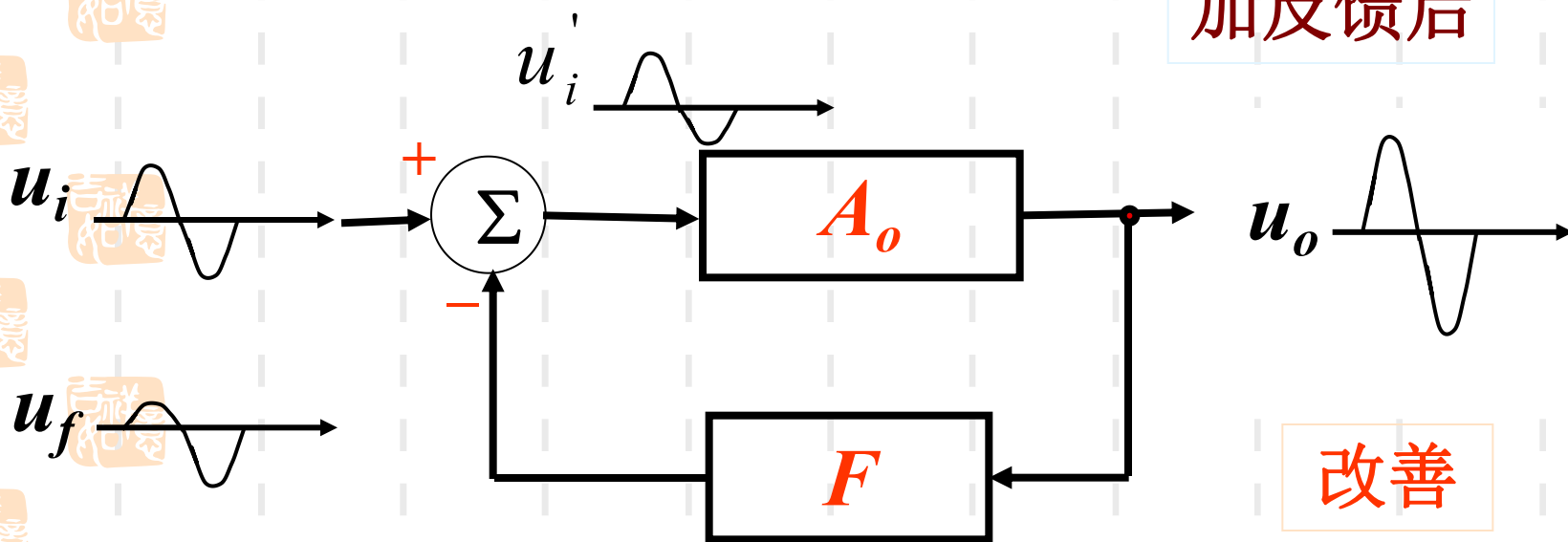


3、改善波形的失真

加反馈前



加反馈后



改善

4、对输入、输出电阻的影响

(1) 串联负反馈使电路的输入电阻增加:

$$r_{if} = (1 + A_o F) r_i$$

例如:射极输出器

理解: 串联负反馈相当于在输入回路中串联了一个电阻, 故输入电阻增加。

(2) 并联负反馈使电路的输入电阻减小:

$$r_{if} = \frac{r_i}{(1 + A_o F)}$$

理解: 并联负反馈相当于在输入回路中并联了一条支路, 故输入电阻减小。

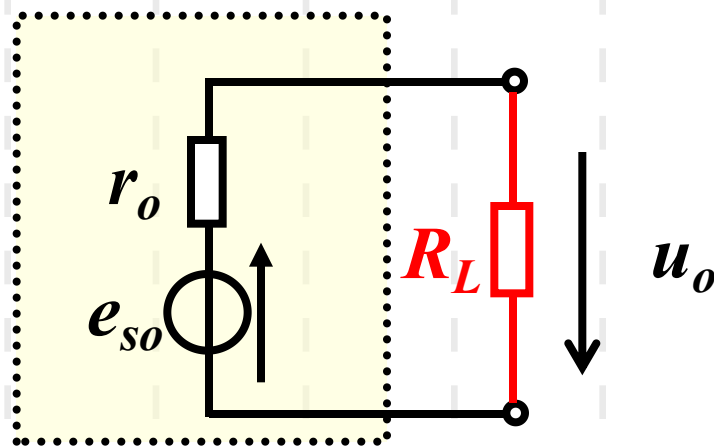
(3) 电压负反馈使电路的输出电阻减小:

$$r_{of} = \frac{r_o}{(1 + A_o F)}$$

例如:射极输出器

理解: 电压负反馈目的是阻止 Δu_o 的变化, 稳定输出电压。

放大电路空载时可等效右图框中为电压源:



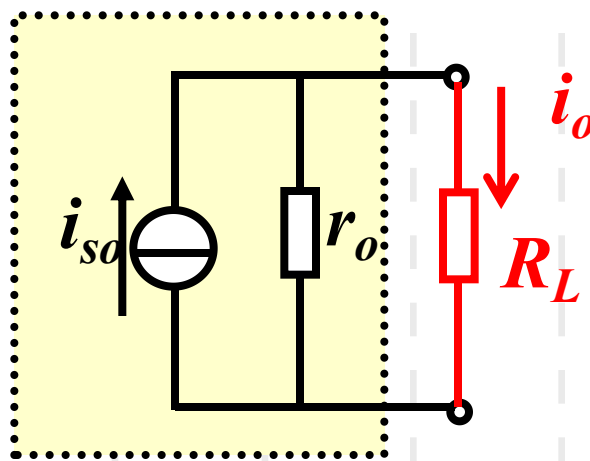
输出电阻越小, 输出电压越稳定, 反之亦然。

(4) 电流负反馈使电路的输出电阻增加:

$$r_{of} = (1 + A_o F) r_o$$

理解: 电流负反馈目的是阻止 Δi_o 的变化, 稳定输出电流。

放大电路空载时可等效为右图框中电流源:



输出电阻越大, 输出电流越稳定, 反之亦然。

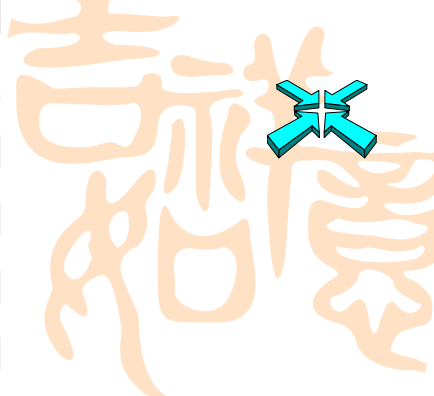
5、抑制干扰和噪声

复习：负反馈类型的判别

注意：直流反馈中，输出电压指 U_{CE} ，输出电流指 I_E 或 I_C 。

用输出短路法来判别电压、电流反馈：

假定放大器的输出端短路，如果此时反馈信号不再存在，就是电压反馈；反之，若反馈信号依然存在，就是电流反馈。



电压反馈与电流反馈判别方法:

电压反馈一般从电压输出端采样，反馈电阻与负载电阻属并联关系。

电流反馈一般嵌入输出回路，反馈电阻与负载电阻属串联关系。

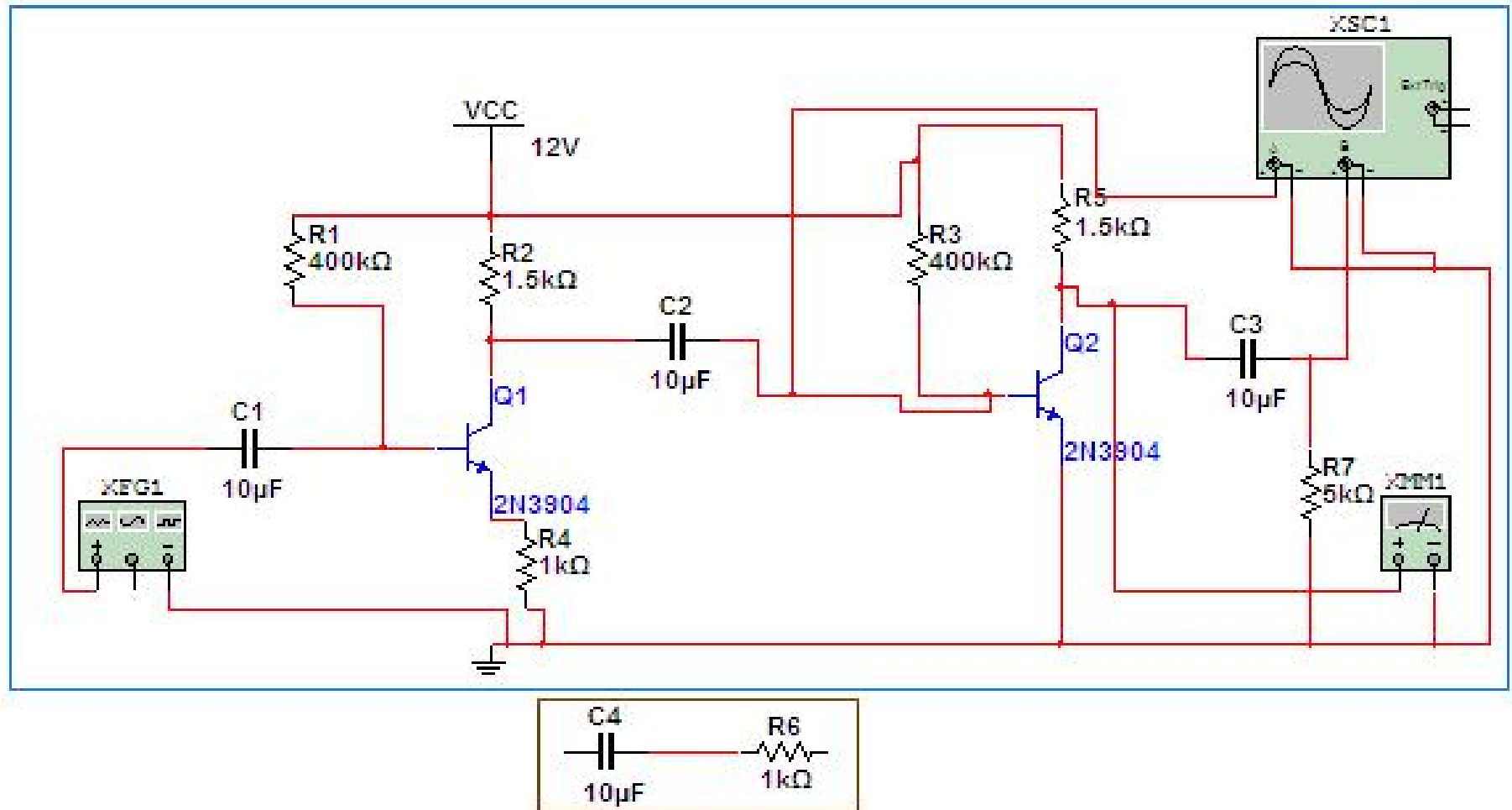
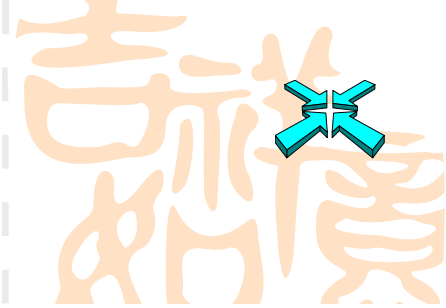
并联反馈与串联反馈判别方法:

并联反馈的反馈信号接于信号输入端（基极）。

串联反馈的反馈信号嵌入输入回路。



实验电路



第三节 直流放大器



1 直接耦合

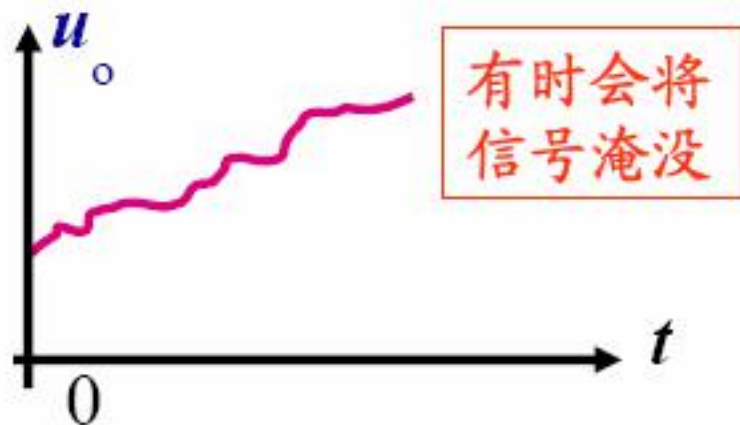
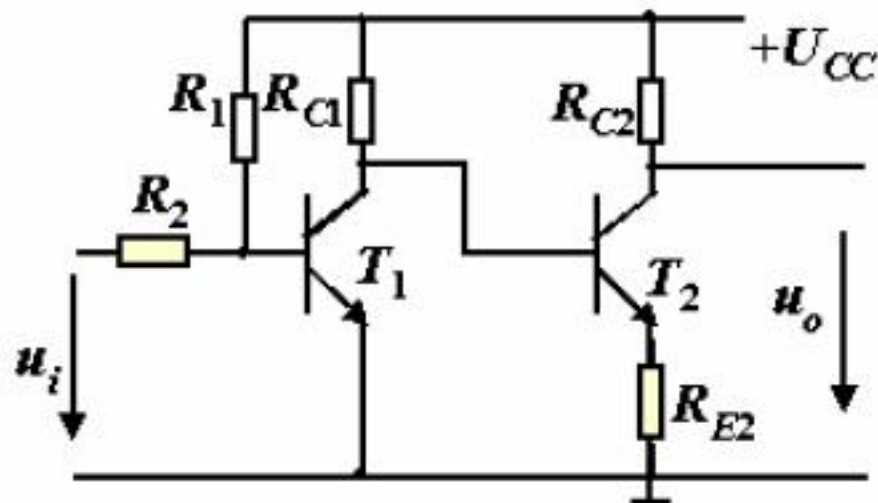
1 电路:

2 优点:

- 可放大缓慢变化的信号。
- 电路中无电容，便于集成化。

3 缺点:

- 各级放大器静态工作点相互影响。
- 输出温度漂移严重。



2 阻容耦合

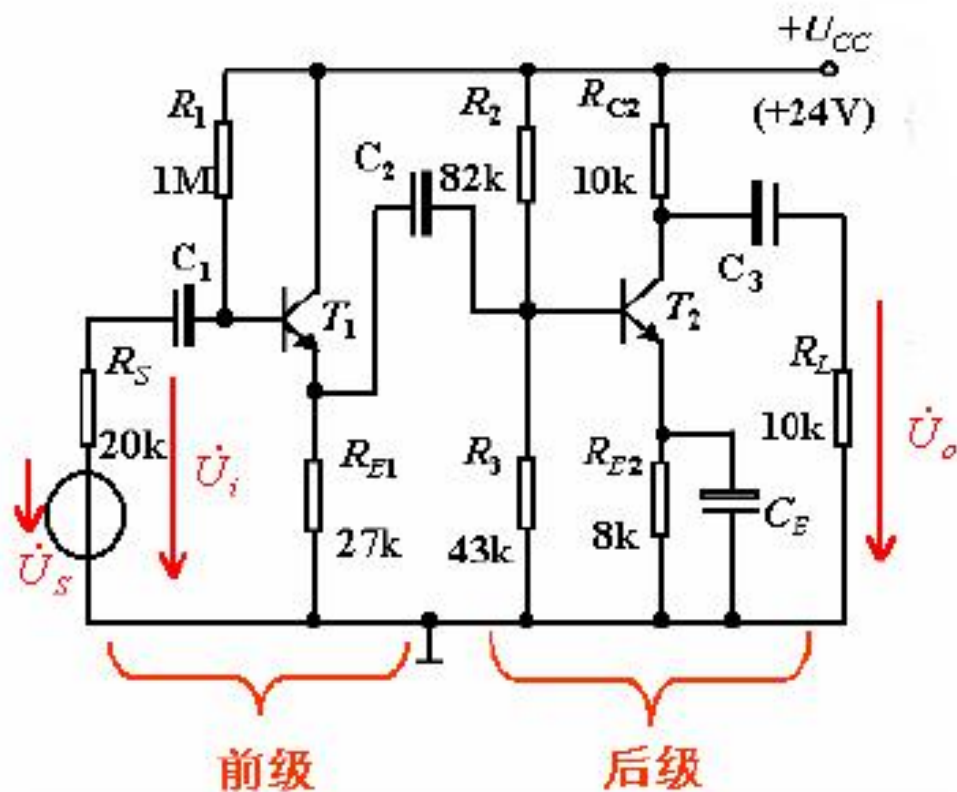
1 电路:

2 优点:

- 各级放大器静态工作点独立。
- 输出温度漂移比较小。

3 缺点:

- 不适合放大缓慢变化的信号。
- 不便于作成集成电路。



3 变压器耦合

1 电路:

2 特点:

- 具有阻抗变换功能。
- 适合大功率、高频放大。

3 缺点:

- 不适合放大缓慢变化的信号。
- 不便于作成集成电路、非常笨重。



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



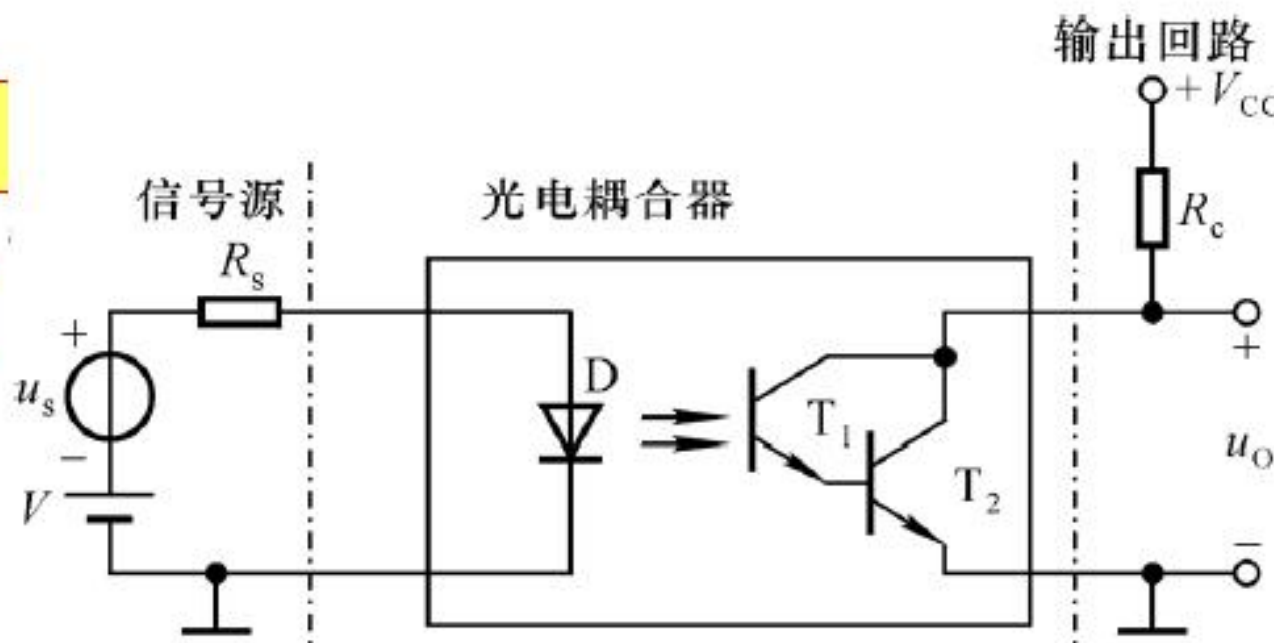
4 光电耦合

1 光电耦合器:

2 电路结构:

3 特点:

- 主要用于电隔离。



$$\text{传输比: } CTR = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_D} \right|_{U_{CE}} = 0.1 \sim 1.5$$



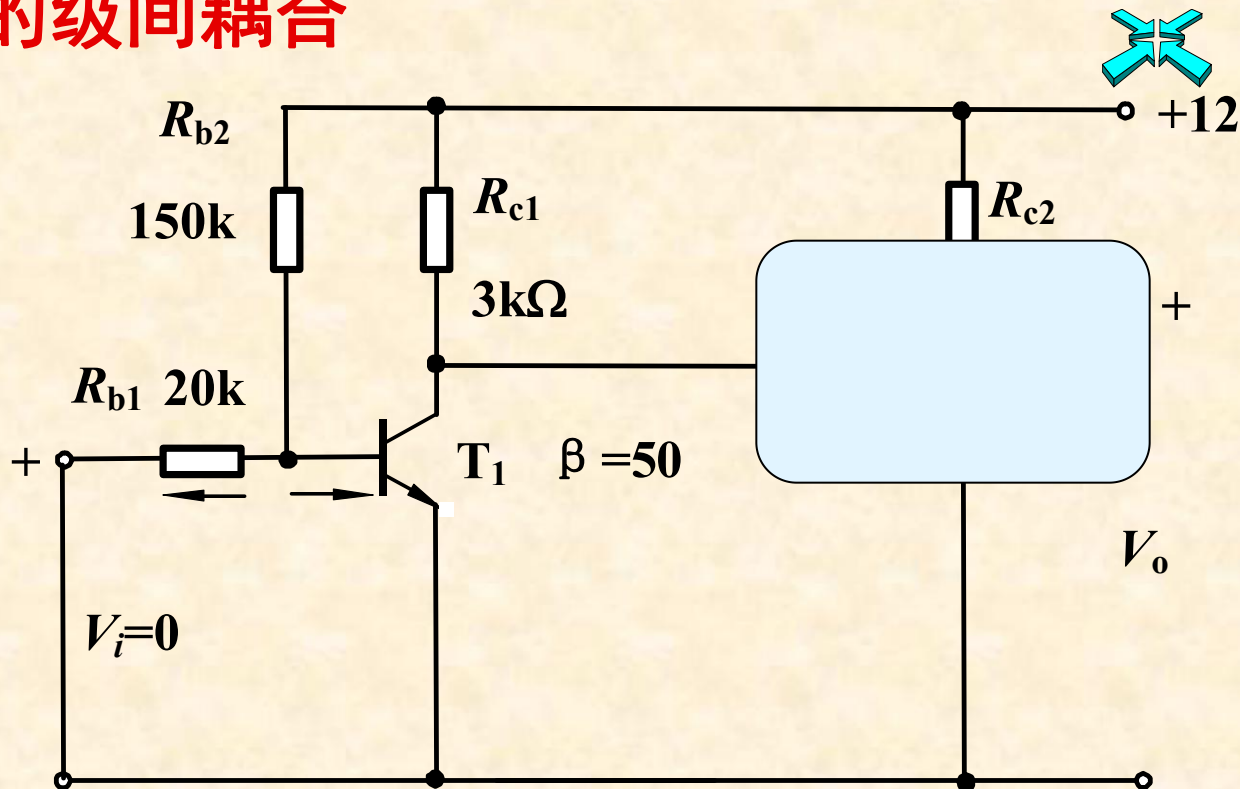
级间耦合方式

- 阻容耦合- 简单可靠，不宜传送缓变信号。
- 变压器耦合- 直流功耗小，阻抗匹配，体积大，笨重，无法集成。
- 直接耦合- 传输无损耗，工作频带宽，可传送直流信号；前后级静态工作点互相牵制，存在零点漂移现象。
- 光电耦合- 电气隔离。

一、直流放大器的级间耦合

1. 前后级间静态互相牵制的

例：
由图知耦合前

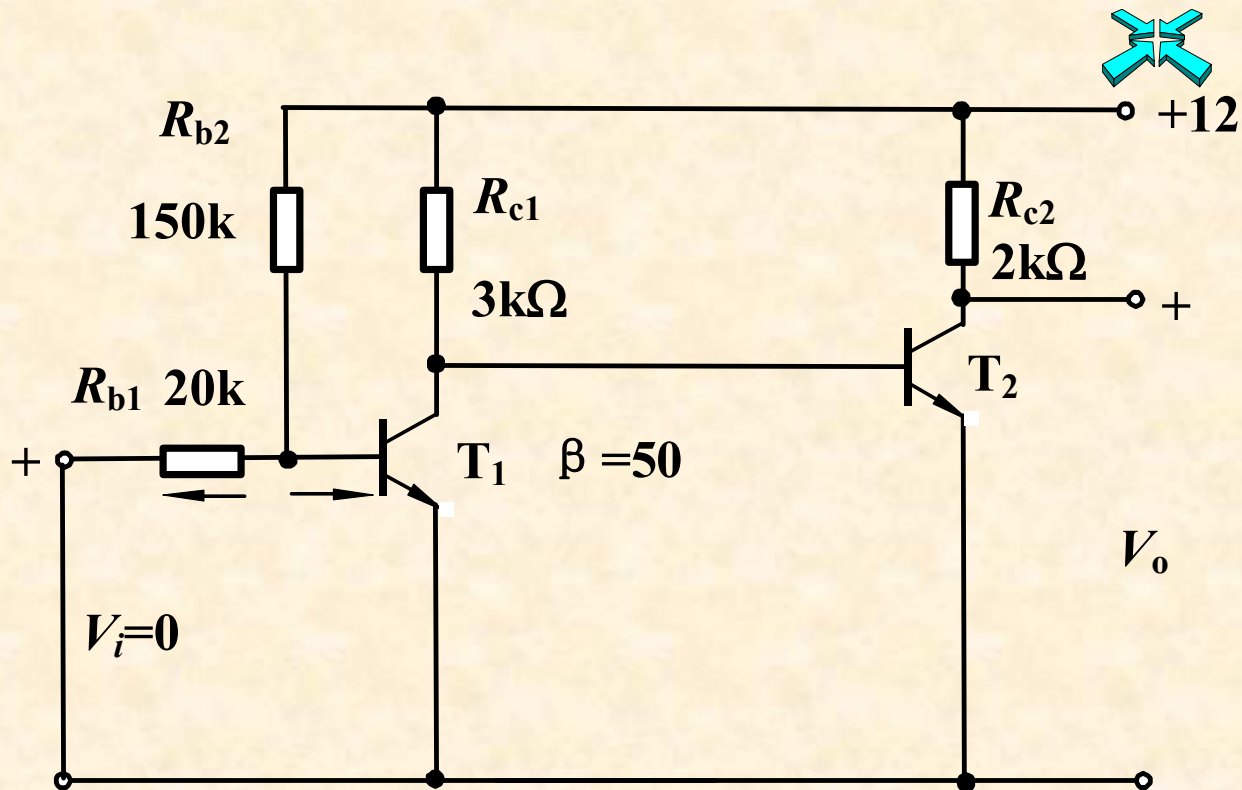


$$I_{b1} = \frac{E_c - U_{be1}}{R_{b2}} - \frac{U_{be1}}{R_{b1}} = \frac{12 - 0.6}{150} - \frac{0.6}{20} = 0.046(mA)$$

$$I_{c1} = \beta_1 I_{b1} = 50 \times 0.046 = 2.3(mA)$$

$$U_{c1} = U_{ce1} = E_c - I_{c1} \cdot R_{c1} = 12 - 2.3 \times 3 = 5.1(V)$$

耦合后



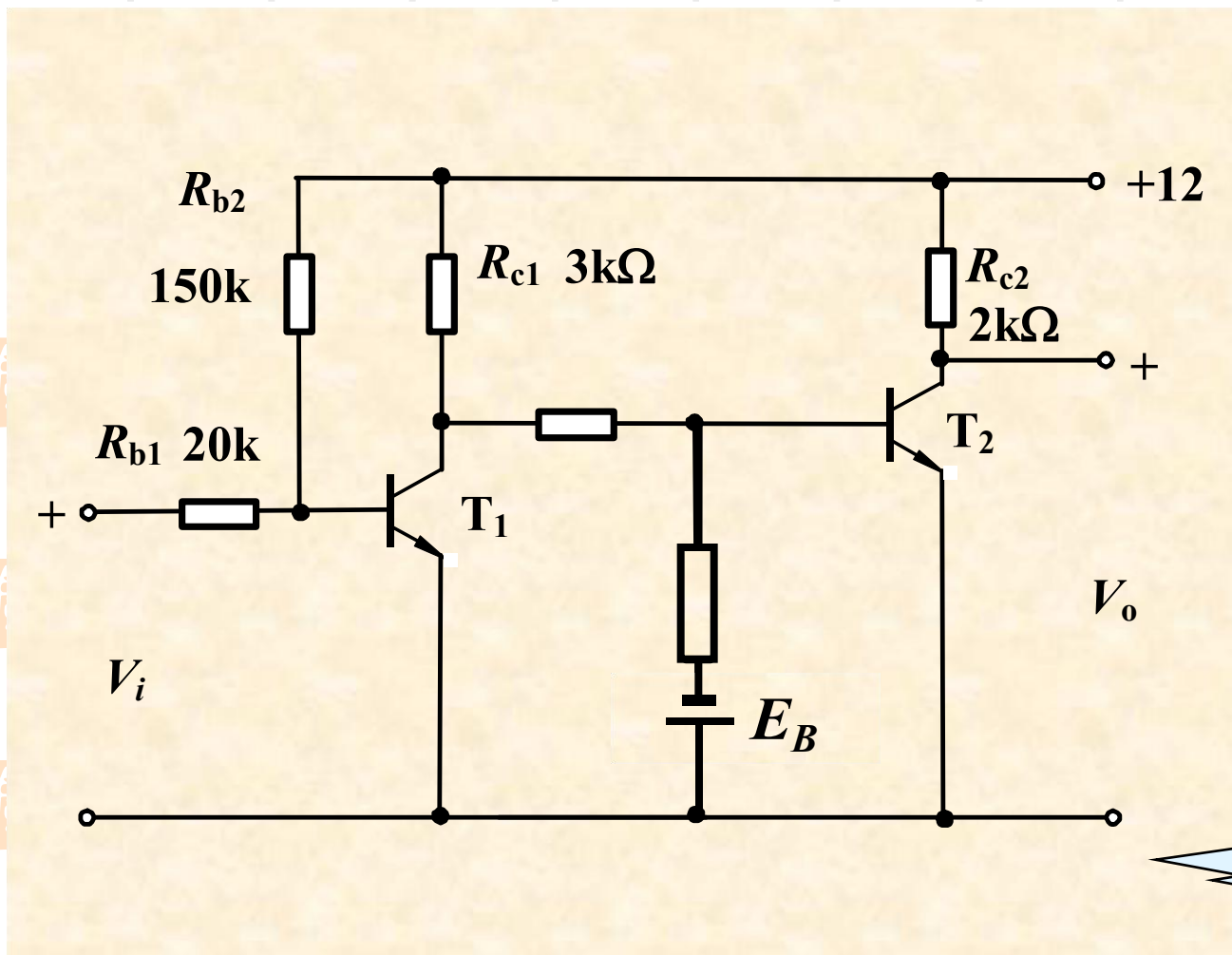
$$U_{c1} = U_{b2} \approx 0.6(V)$$

$$I_{c1} = 2.3(mA)$$

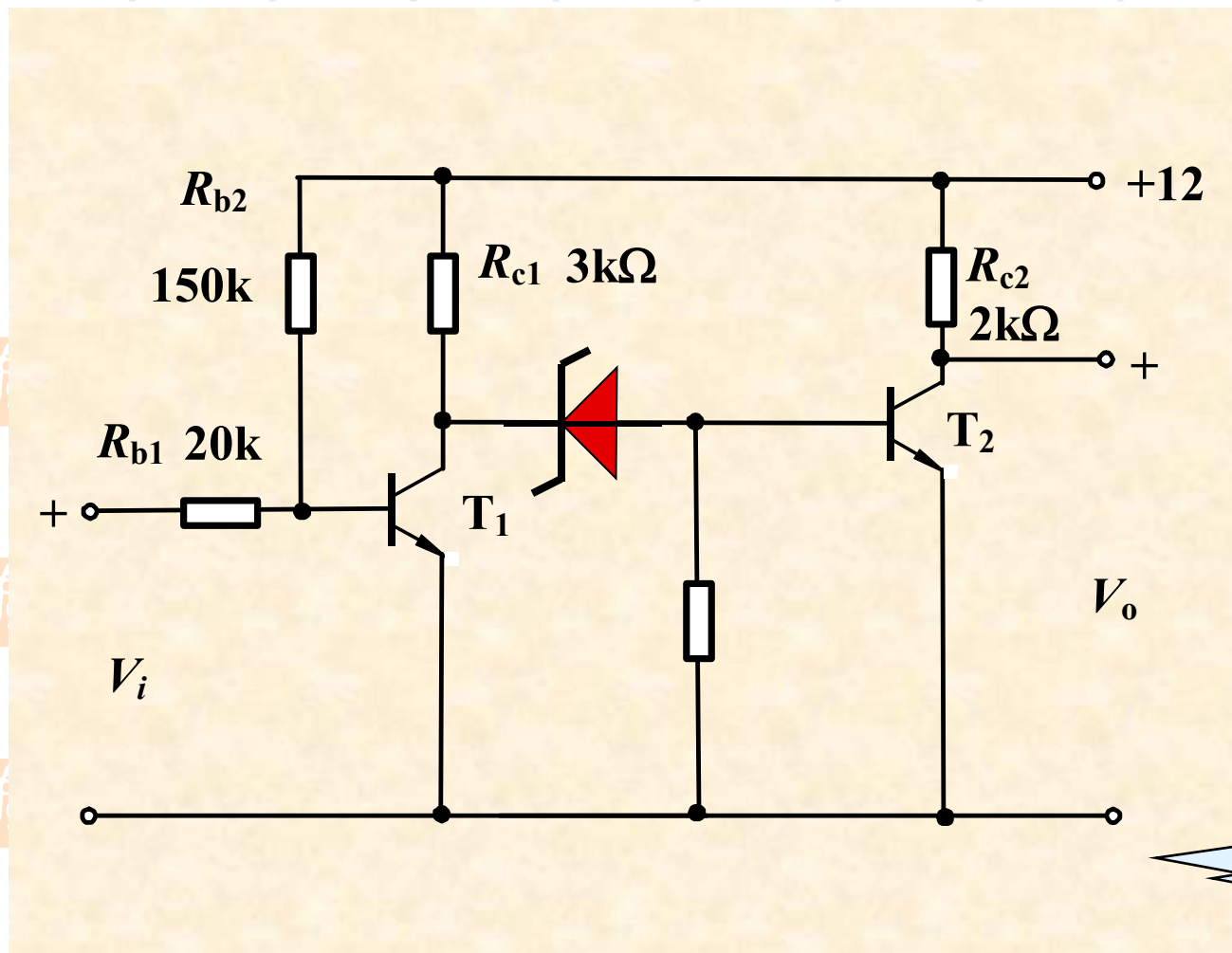
$$\begin{aligned} I_{b2} &= I_{c1}' - I_{c1} = (E_c - U_{c1}) / R_{c1} - I_{c1} \\ &= (12 - 0.6) / 3 - 2.3 = 1.5(mA) \end{aligned}$$

解决方法

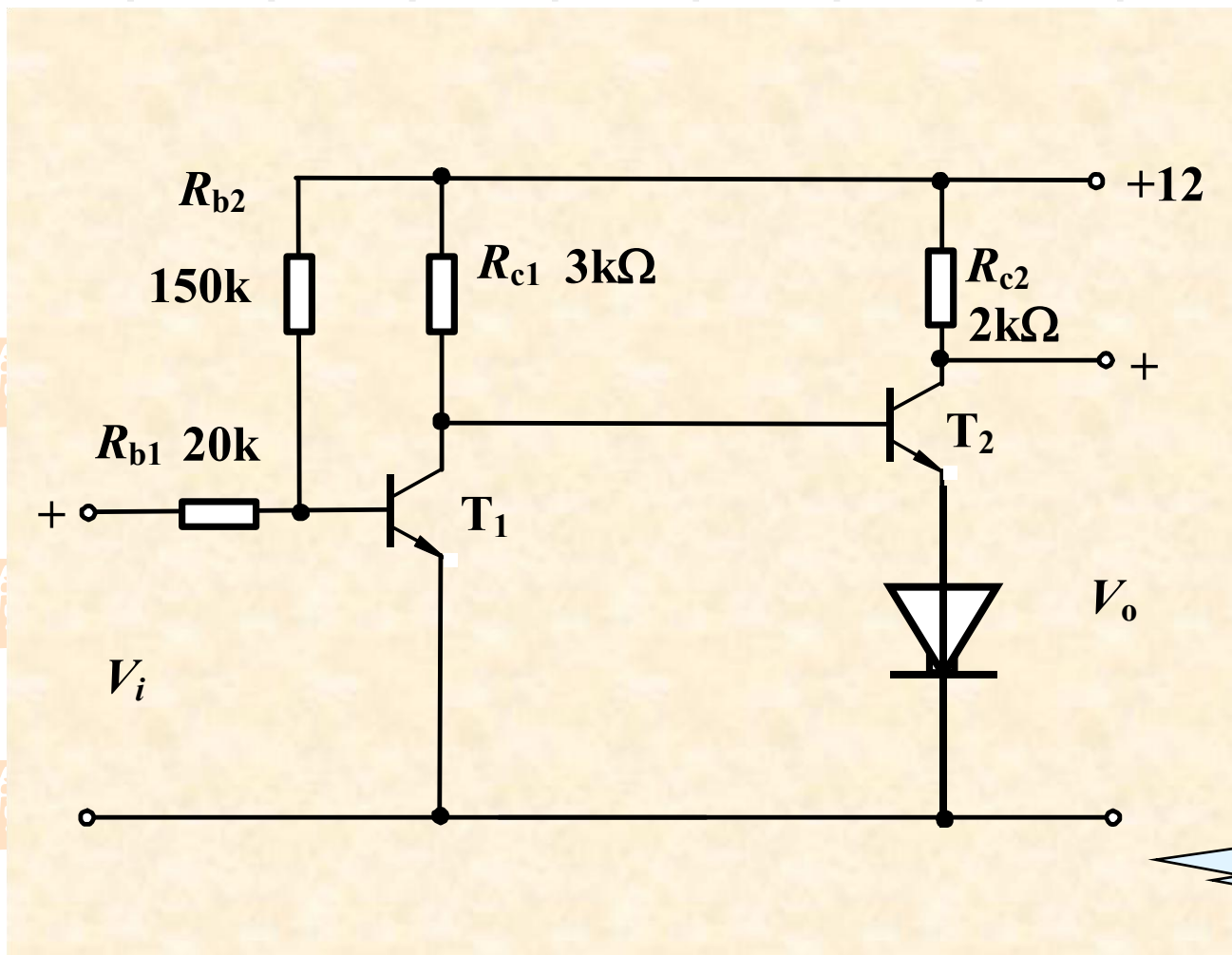
■ (1) 分压式耦合电路



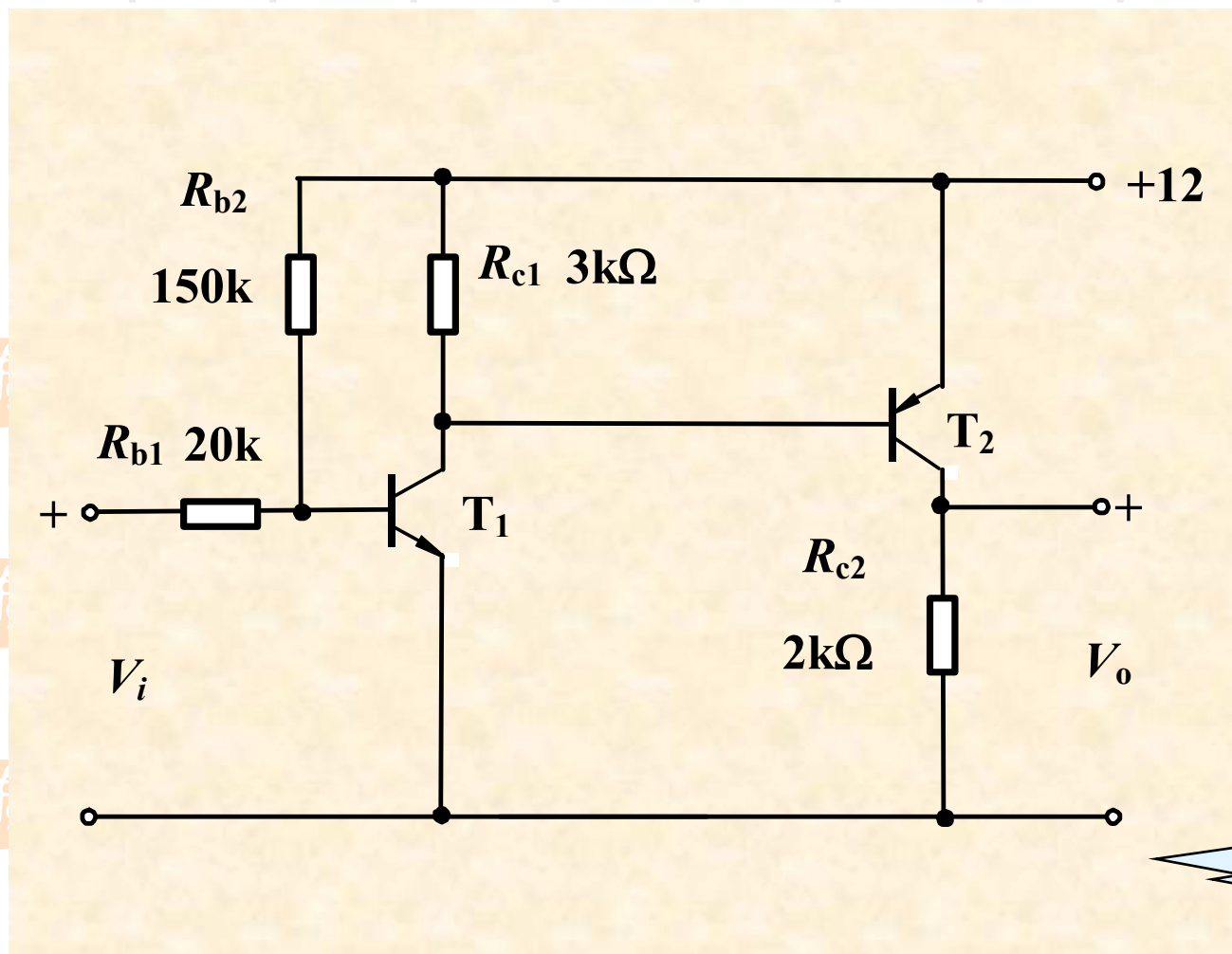
- (2) 稳压管耦合电路
- 稳压管交流内阻很小



- (3) 短路线耦合电路
- 垫高次级射极电位



■ (4) PNP-NPN管直接耦合电路



2. 直接耦合放大电路的零点漂移

(1) 零漂:

输入短路时，输出仍有缓慢变化

电源电压波动
也是原因之一

主要原因: 温度变化引起，也称**温漂** (*zero drift*)。

温漂指标: 温度每升高1度时，输出漂移电压按电压增益折算到输入端的等效输入漂移电压值。

影响: 零点漂移引起的输出电压变化与被放大的有用信号无法区别开，对于直流放大器，前级引起的零点漂移电压，被后级放大，最后将掩盖正常输出，造成错误输出。

(a) 测量电压

(b) 输出电压漂移波形

例如

假设 $A_{v1} = 100$,
 $A_{v2} = 100$, $A_{v3} = 1$ 。

若第一级漂了 $100\text{ }\mu\text{V}$,
则输出漂移 1 V 。

若第二级也
漂了 $100\text{ }\mu\text{V}$,

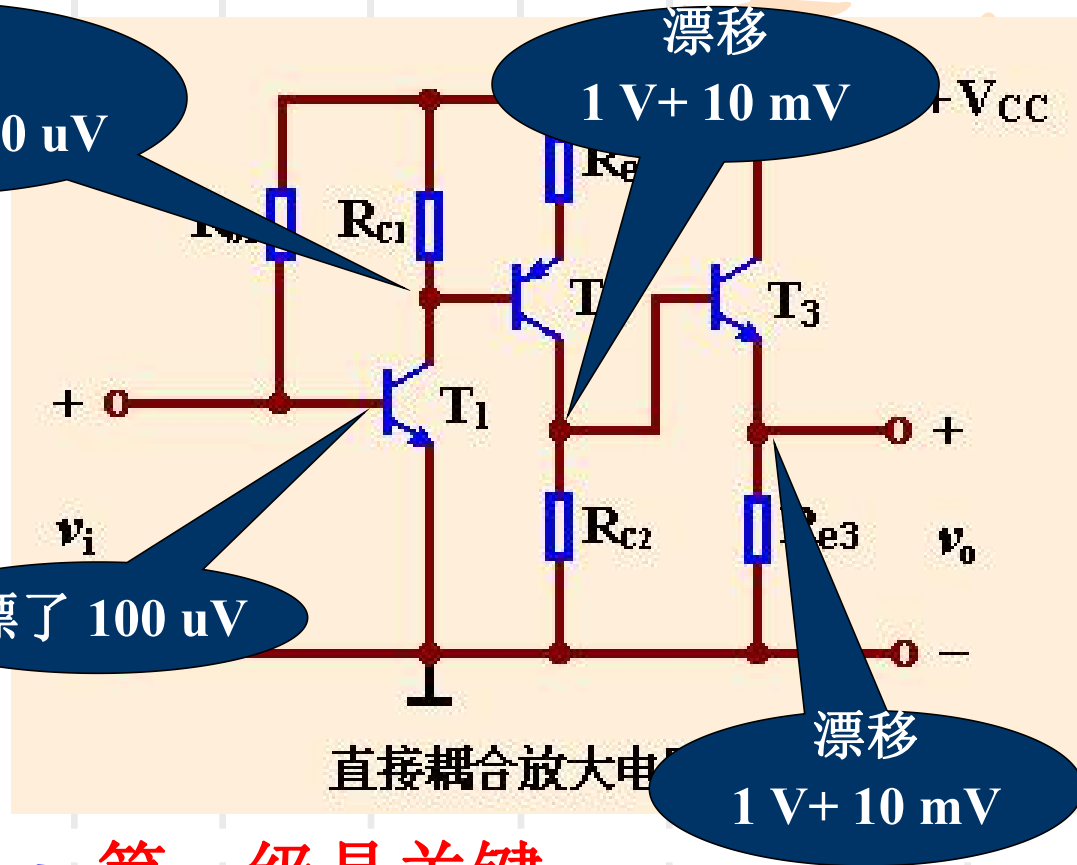
则输出漂移 10 mV 。



第一级是关键

(2) 减小零漂的措施

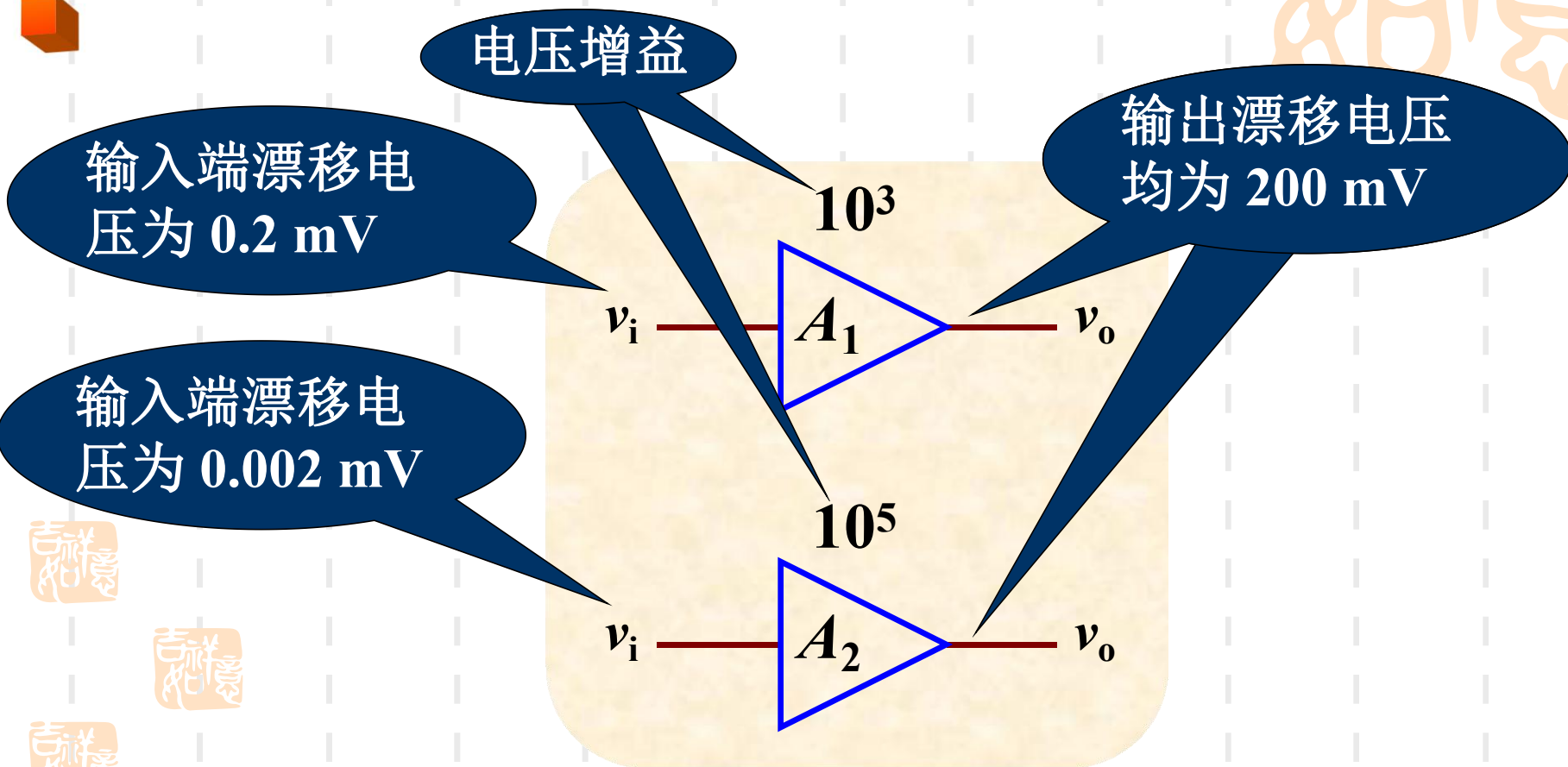
- 用非线性元件进行温度补偿
- 调制解调方式
- 采用差分式放大电路



(思考题)



思考题



两个放大电路是否都可以放大0.1mV的信号?

答: A_1 不可以, A_2 可以

二、差分放大器(*differential amplifier*)

(1) 差分式放大电路结构

差分放大电路是由对称的两个基本放大电路，通过射极公共电阻耦合构成的。对称的含义是两个三极管的特性一致，电路参数对应相等。

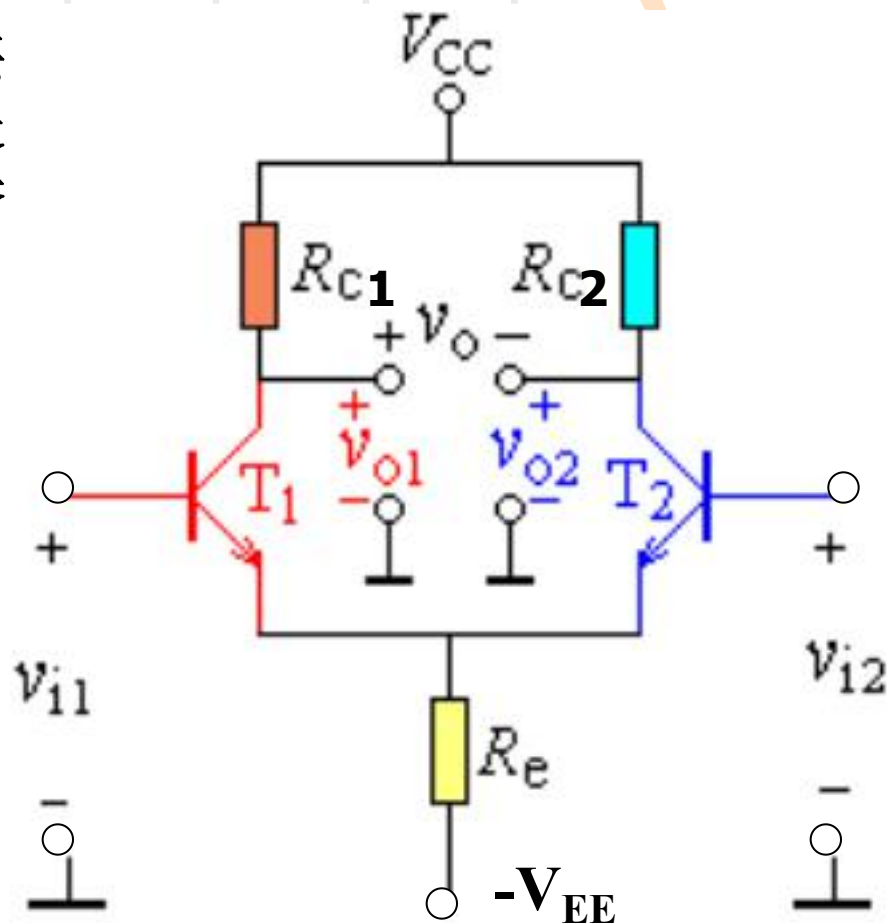
即： $\beta_1 = \beta_2 = \beta$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}$$

$$r_{be1} = r_{be2} = r_{be}$$

$$I_{CBO1} = I_{CBO2} = I_{CBO}$$

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C$$



(2) 差分放大电路的输入输出方式



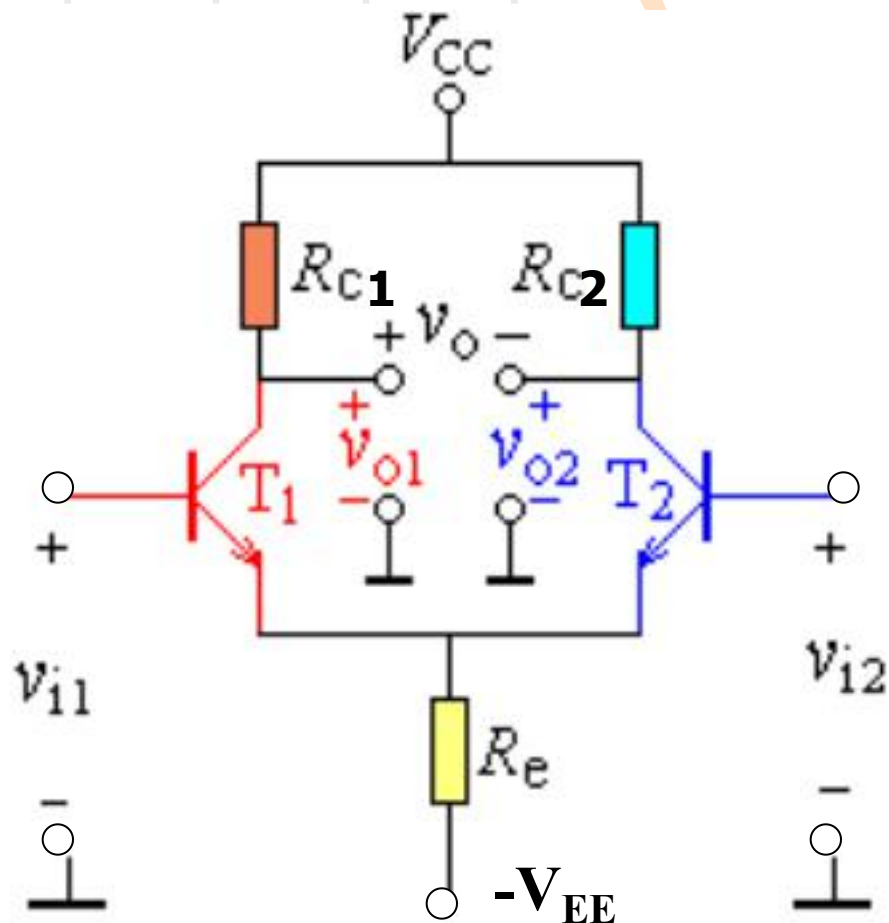
信号的输入方式:

若信号同时加到两个输入端, 称为**双端输入**;

若信号仅从一个输入端对地加入, 称为**单端输入**。

差分放大电路可以有两个输出端, 一个是集电极 C_1 , 另一个是集电极 C_2 。

从 C_1 和 C_2 输出称为**双端输出**, 仅从集电极 C_1 或 C_2 对地输出称为**单端输出**。



(3) 差模信号和共模信号

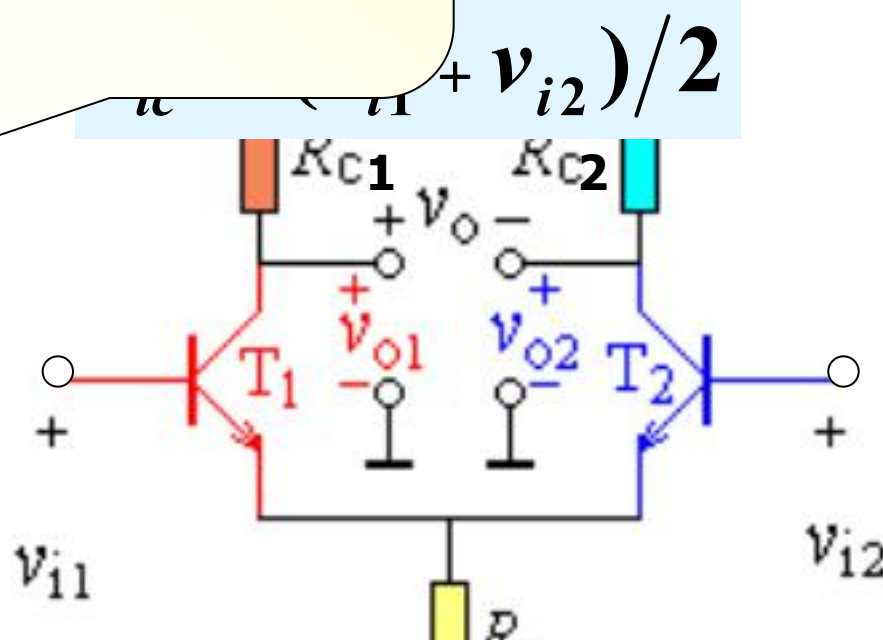


共模信号 v_{ic} 即是在两个输入端加上幅度相等，极性相同的信号。

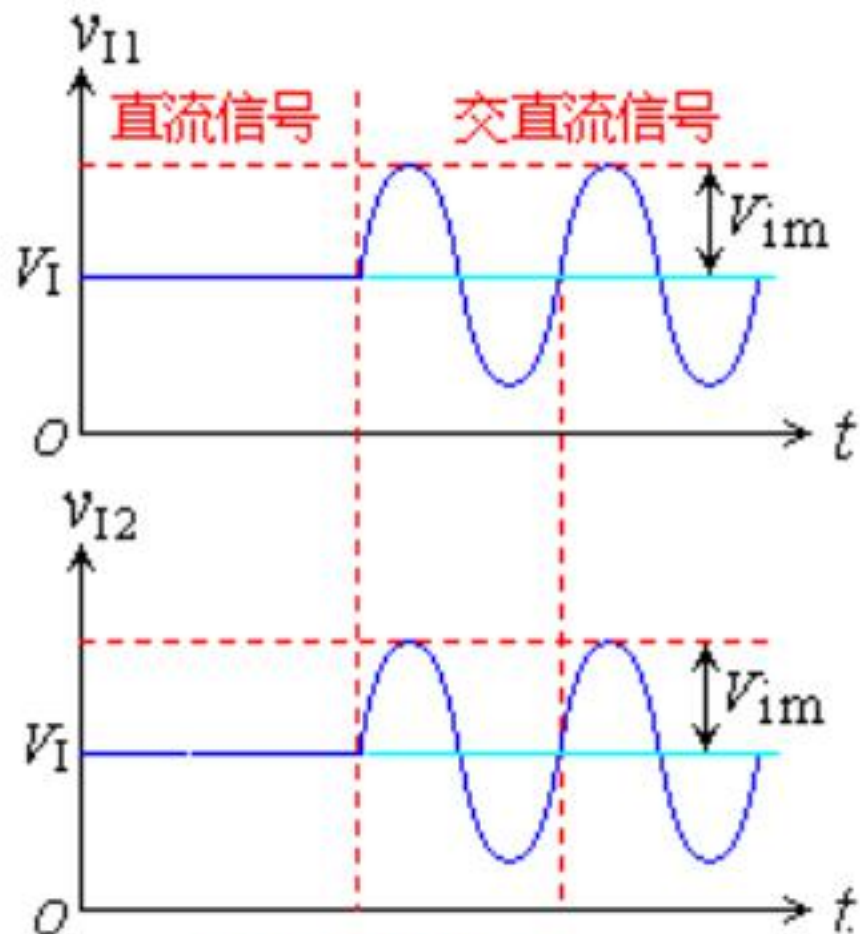
差模信号 v_{id} 即是在两个输入端加上幅度相等，极性相反的信号。

$$v_{i1} = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2}$$

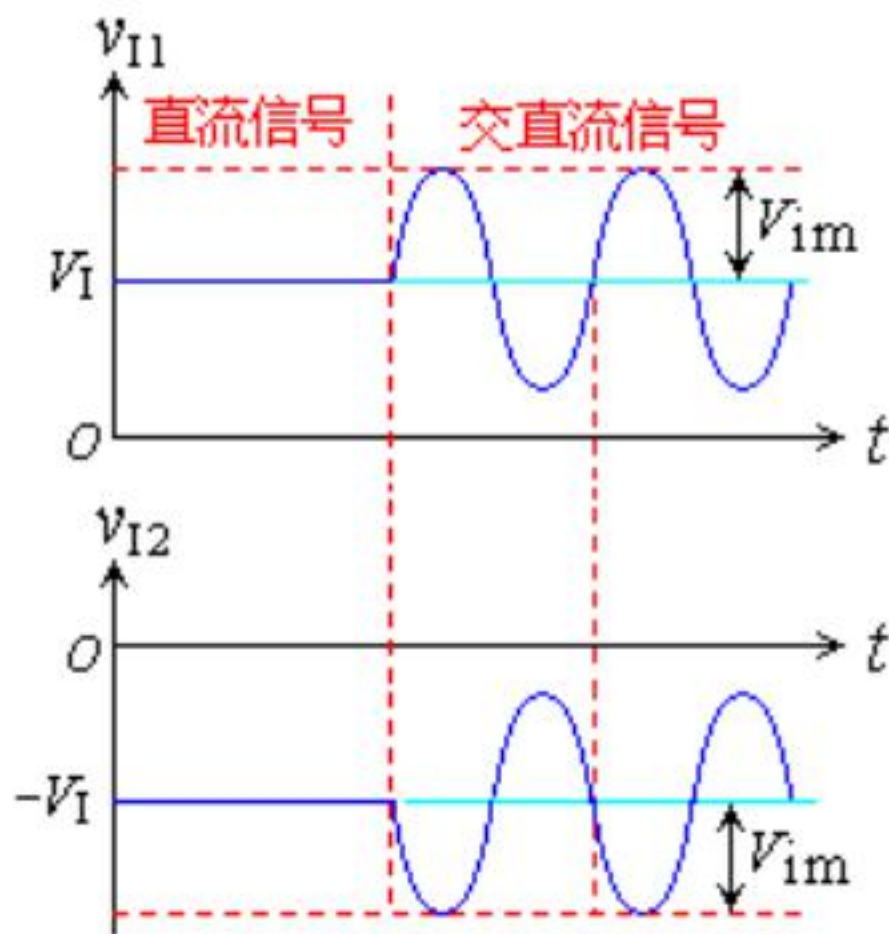
$$v_{i2} = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$



可以看出，两个输入端的信号均可分解为差模信号和共模信号两部分。



(a) 共模信号

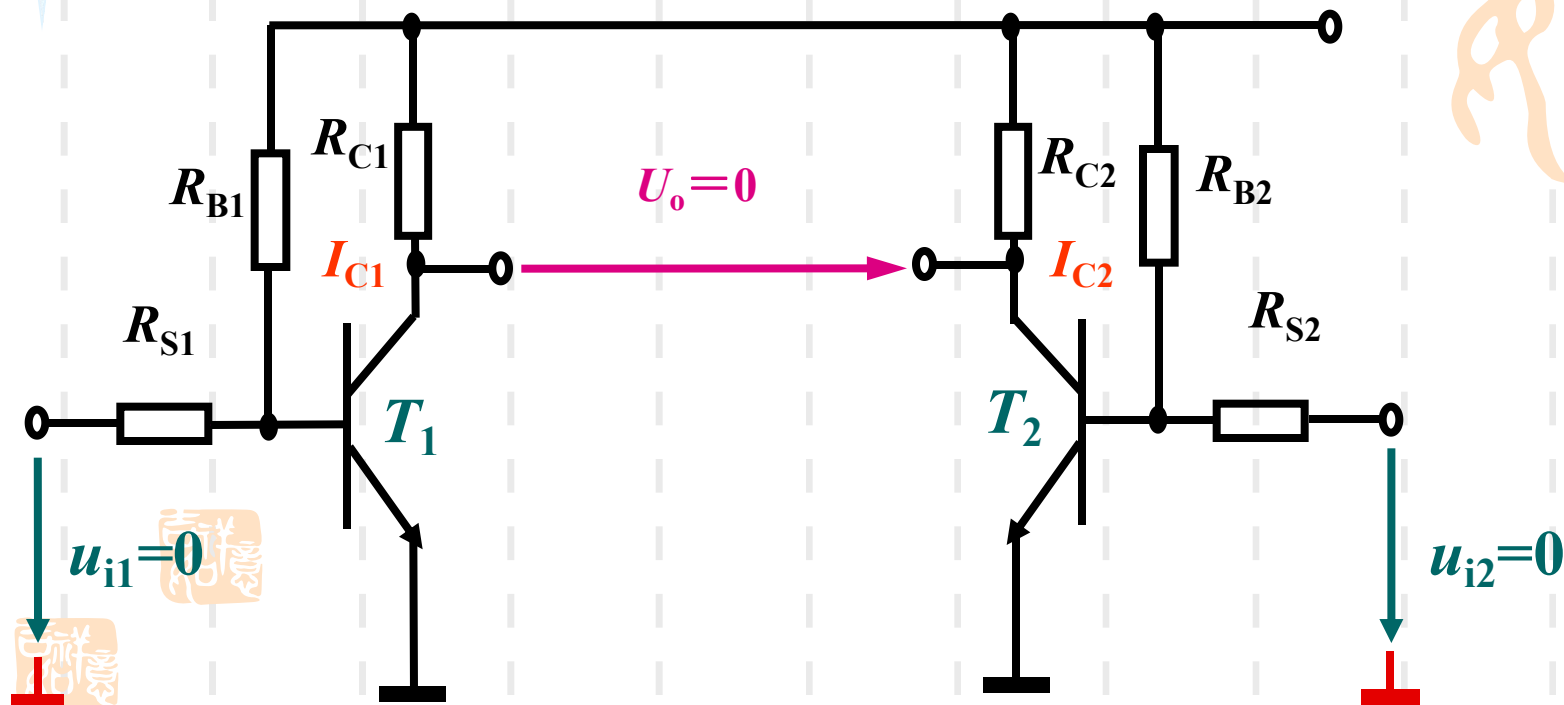


(b) 差模信号

差分放大电路能放大差模信号，抑制共模信号。

1. 零点漂移的抑制

(1) 当没有输入信号



$$u_{i1} = u_{i2} = 0$$

$$R_{C1}I_{C1} = R_{C2}I_{C2}$$

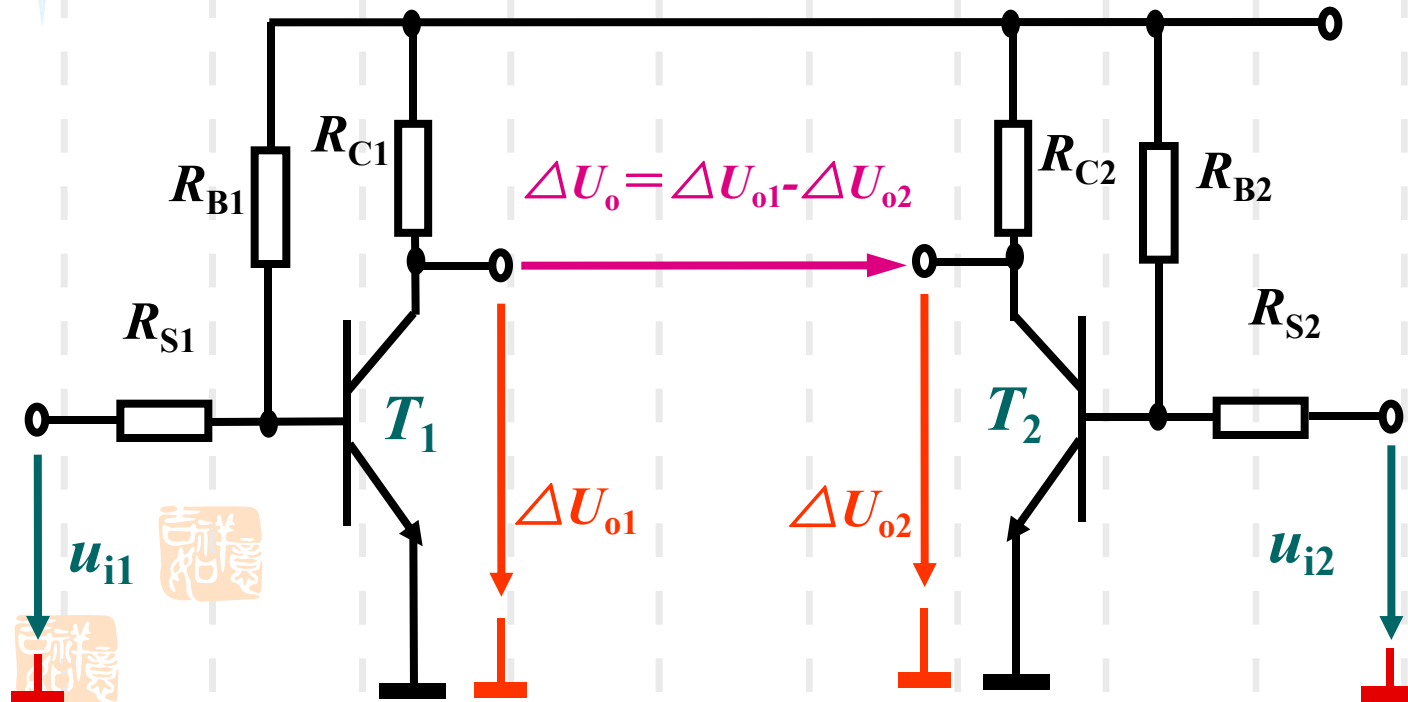
$$U_{C1} = U_{C2}$$

$$U_o = 0$$

输入信号电压为零时，输出信号电压也为零。

1. 零点漂移的抑制

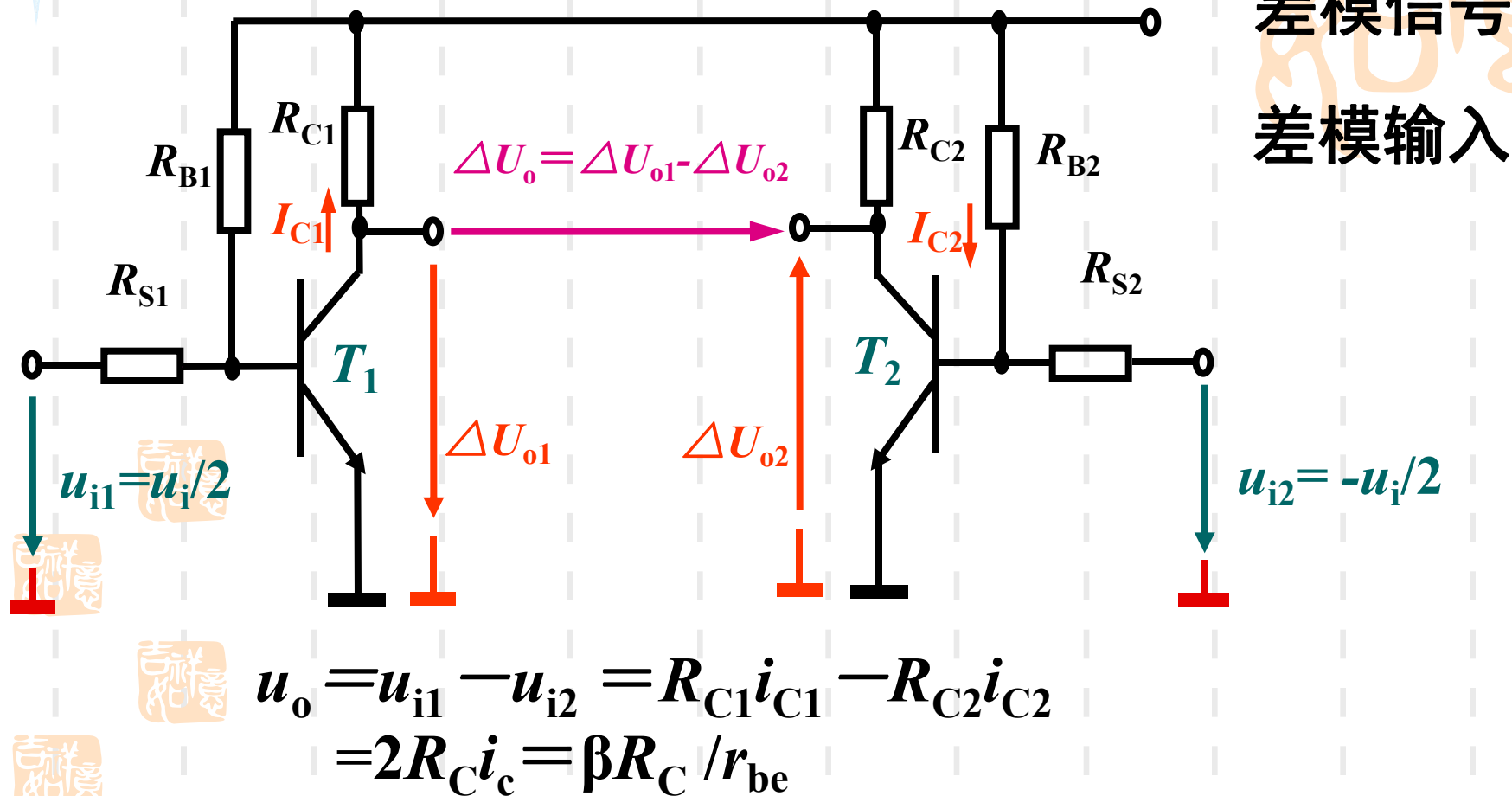
(2) 温度变化时



共模信号
共模输入

相同的变化量互相抵消，致使输出电压不变，从而抑制了零点漂移

2. 差分放大器对信号的放大作用



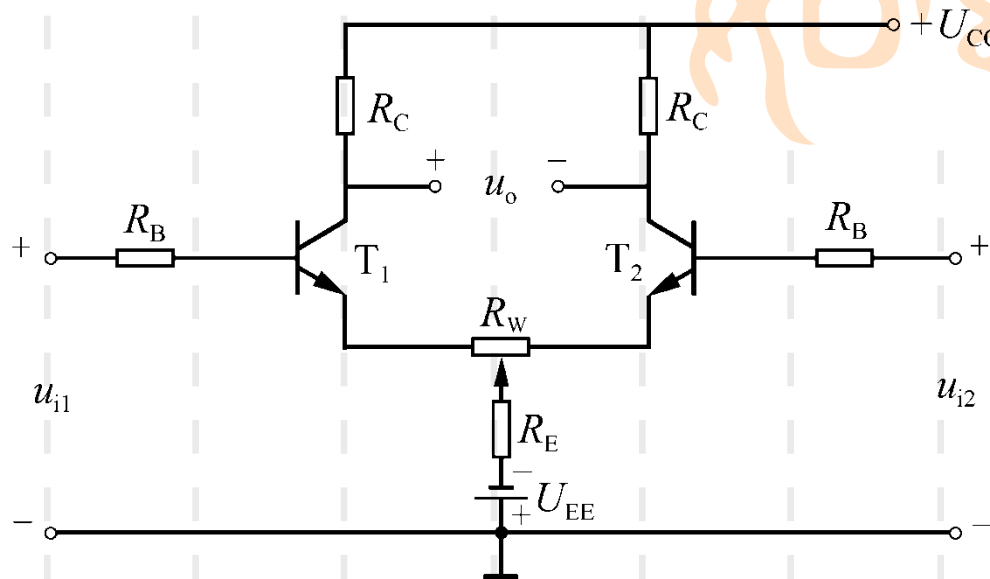
电路是根据两个输入信号之差来工作的，所以有差动式电路之称。

3.典型差分放大器的改进

- 改进原因:
- 在实际电路中, 完全对称的情况并不存在, 单靠电路的对称性来抑制零点漂移是有限的;
- 同时差分电路中每个管的集电极电位的漂移并未得到抑制, 如果采用单端输出则根本无法抑制漂移, 必须从改进电路着手, 来减小每个三极管自身的零点漂移。

(1) 长尾式差分放大器

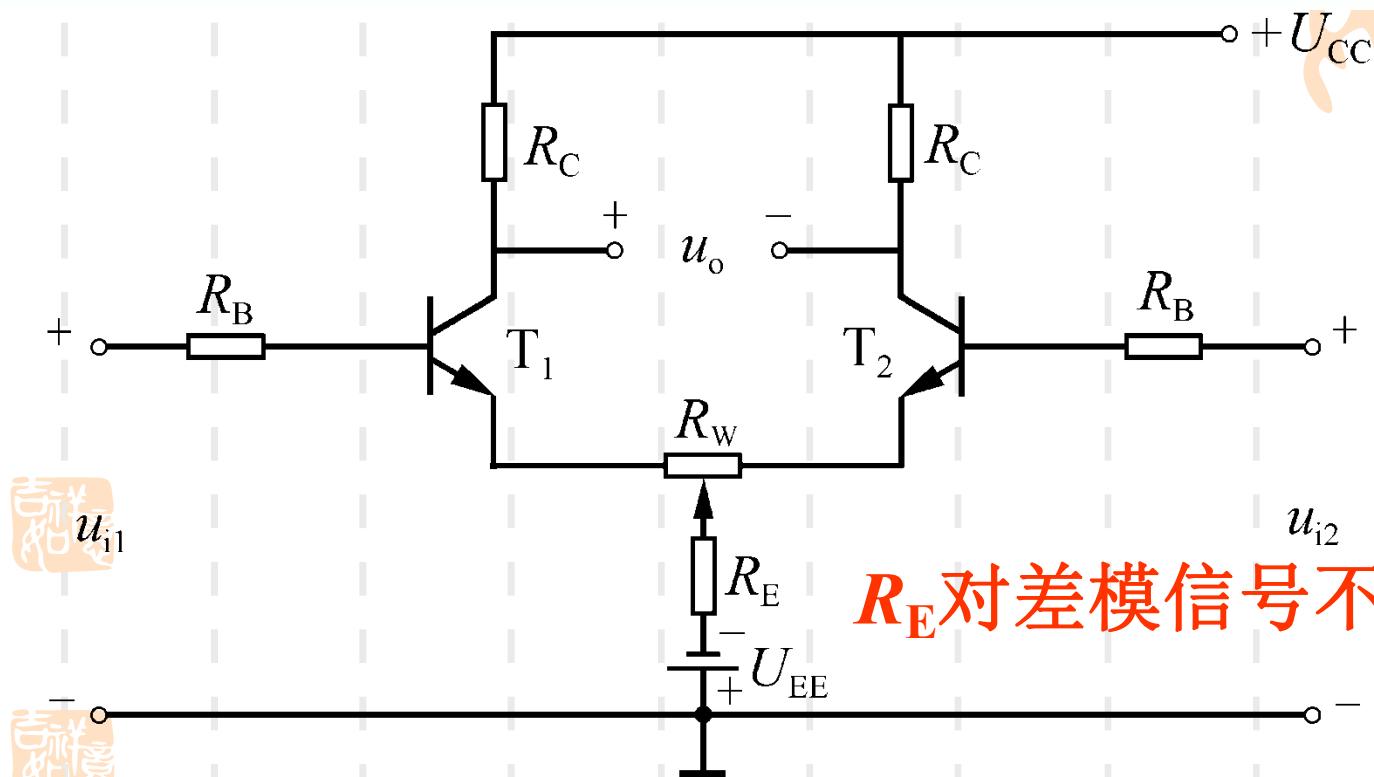
电路特点：接入射极电阻 R_E 、辅助负电源 U_{EE} ，采用正负双电源供电。为使电路左右平衡，设置调零电位器 R_W 。



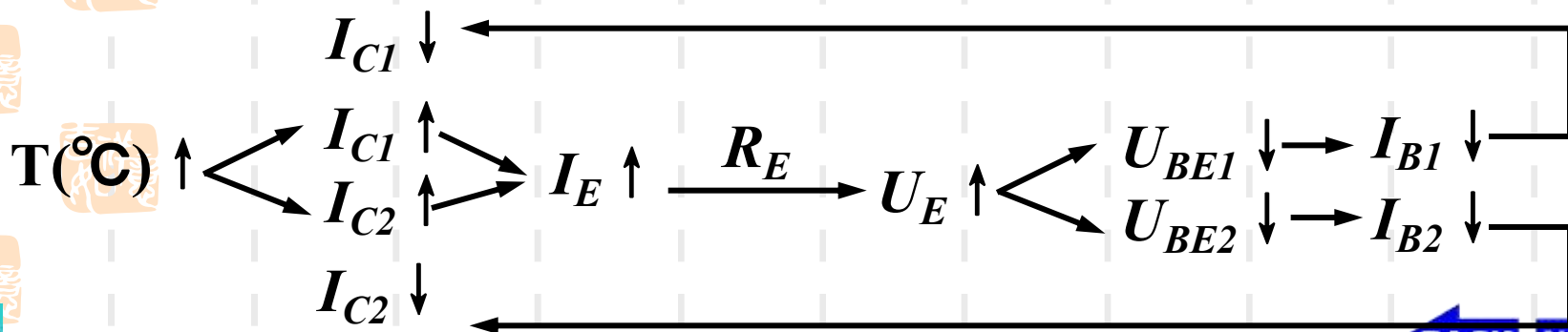
双电源的作用：

- 1) 使信号变化幅度加大。
- 2) I_{B1} 、 I_{B2} 由负电源 $-U_{EE}$ 提供。

射极电阻 R_E 的作用是稳定静态工作点，限制每一个三极管的漂移范围，减小每个管子的零点漂移。



R_E 对差模信号不起作用



差分放大器共模抑制比（CMRR）的定义

CMRR — Common Mode Rejection Ratio

共模抑制比：放大器对差模信号的放大倍数和对共模信号的放大倍数之比。

$$K_{\text{CMMR}} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad K_{\text{CMMR}} (\text{DB}) = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \text{ dB(分贝)}$$

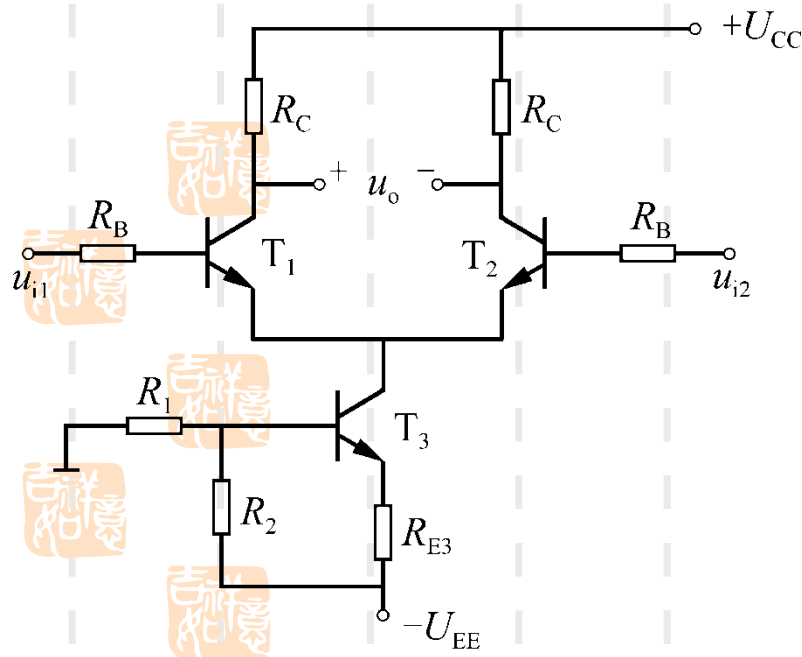
双端输出，理想情况 $K_{\text{CMMR}} = \infty$

单端输出 $K_{\text{CMMR}} = \left| \frac{A_{d1}}{A_{c1}} \right| \approx \frac{\beta \cdot 2R_E}{r_{be}}$

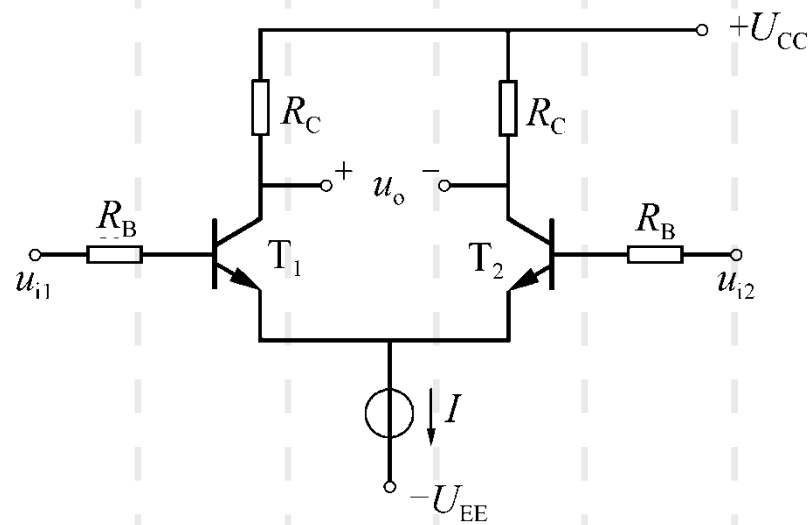
共模抑制比愈大，说明电路抑制零漂能力愈强。

(2) 恒流源式差放电路

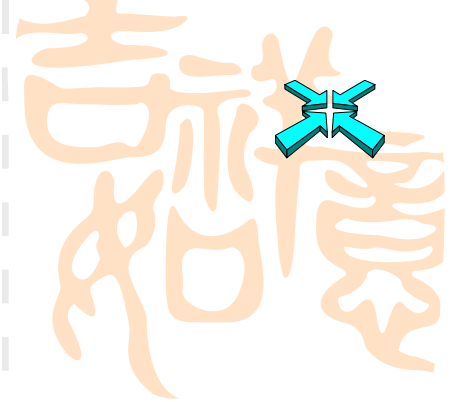
在差分电路中，提高共模抑制比的有效途径是增大射极电阻 R_E ，但会造成静态工作点偏低，虽然采用负电源 $-U_{EE}$ 进行补偿，但是 R_E 仍不能太大，实际运用中用恒流源来代替射极电阻是常用措施之一。



(a) T_3 管组成恒流源的差分放大器



(b) 恒流源电路的简化画法

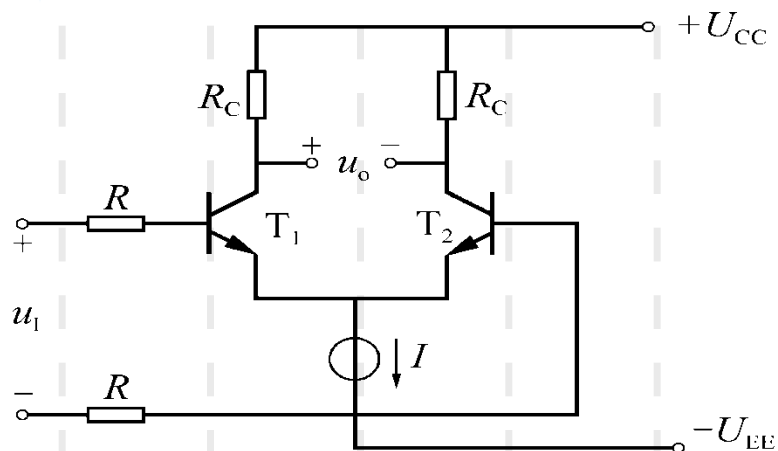


恒流源的作用

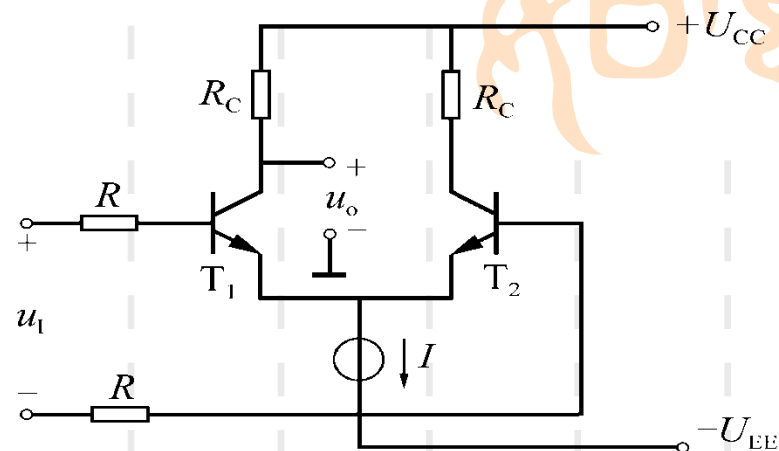
1. 恒流源相当于阻值很大的电阻。
2. 恒流源不影响差模放大倍数。
3. 恒流源影响共模放大倍数，使共模放大倍数减小，从而增加共模抑制比，理想的恒流源相当于阻值为无穷大的电阻，所以共模抑制比是无穷。



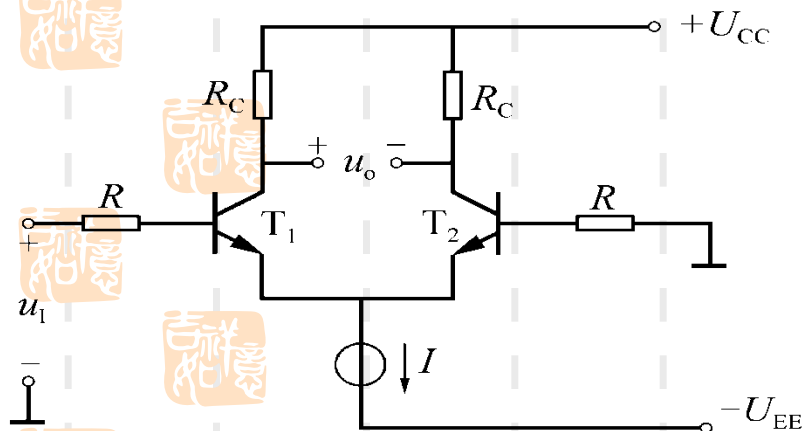
4. 差分放大器的输入输出方式



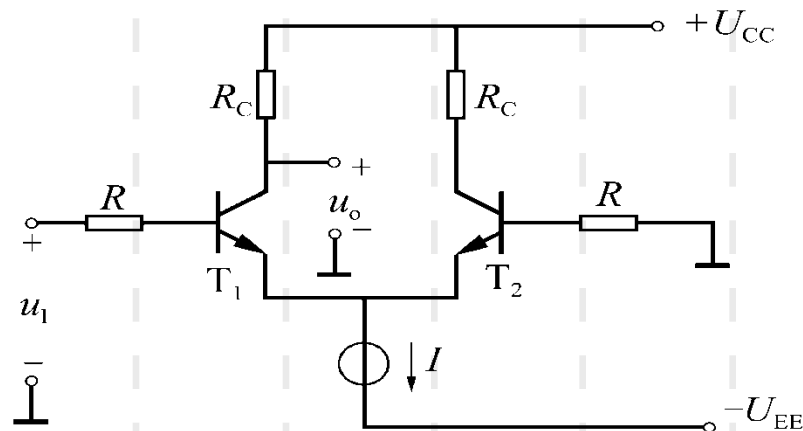
(a) 双端输入—双端输出



(b) 双端输入—单端输出



(c) 单端输入—双端输出



(d) 单端输入—单端输出



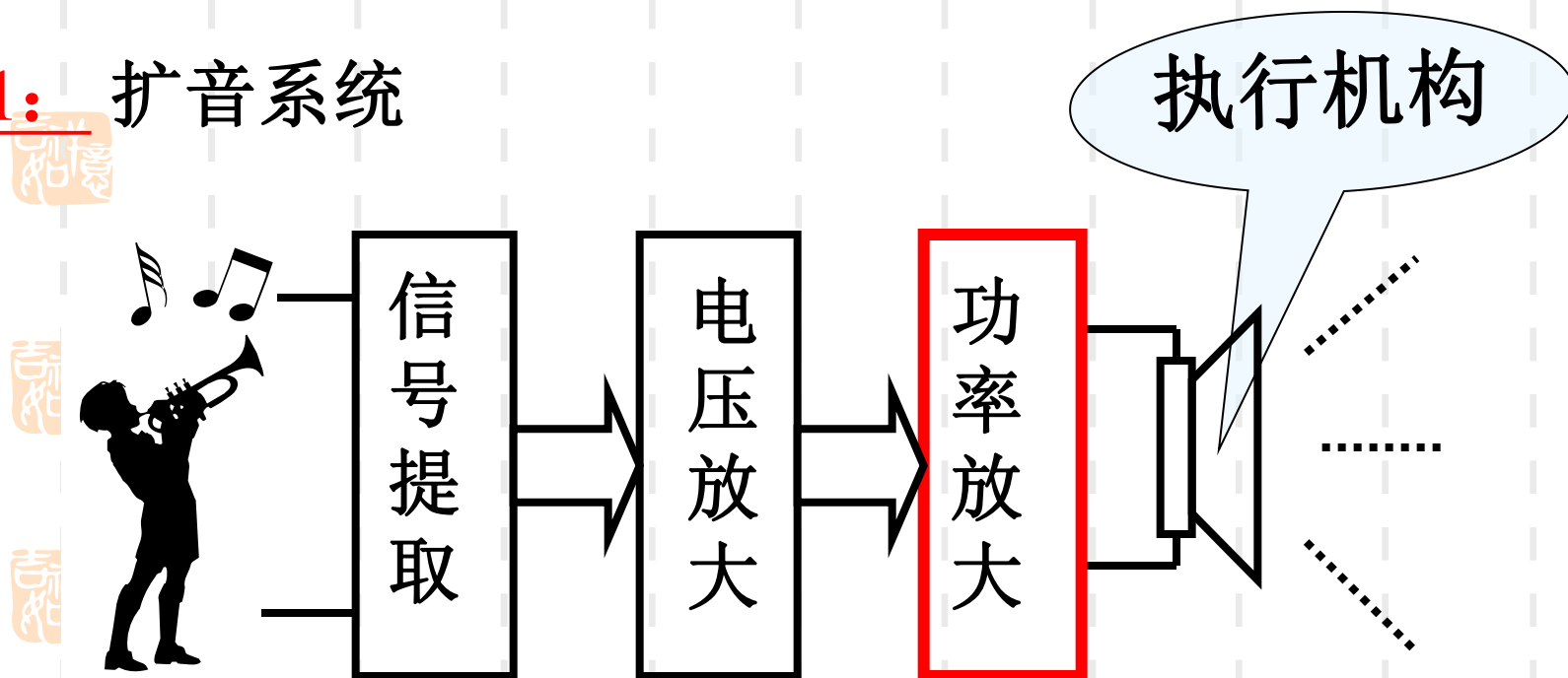
- 差分放大器具有抑制零点漂移，且有灵活的输入输出方式，被广泛应用于各种生物医学测量仪器中。
- 它是集成运算放大器的基础。



第四节 功率放大器

功率放大器的作用：用作放大电路的**输出级**，以驱动执行机构。如使扬声器发声、继电器动作、仪表指针偏转等。

例1：扩音系统



一、功率放大器的特点和分类



1. 功率放大器的主要特点

功率放大器是一种以输出较大功率为目的的放大电路。因此，要求同时输出较大的电压和电流。管子工作在接近极限状态。

一般直接驱动负载，带载能力要强。

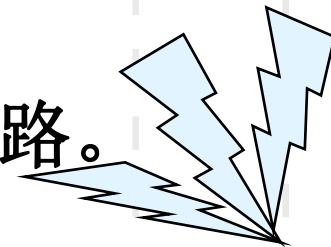
2. 功率放大器与前置电压放大器的区别

(1).本质相同:

电压放大电路：主要用于放大电压。

功率放大电路：主要输出较大的功率。

以能量控制的观点，本质都是能量转换电路。





(2). 任务不同

电压放大电路：主要任务是使负载得到不失真的电压信号。输出的功率并不一定大。在小信号状态下工作。

功率放大电路：主要任务是使负载得到不失真（或失真较小）的输出功率。在大信号状态下工作。

(3). 指标不同

电压放大电路：主要指标是电压增益、输入和输出阻抗。

功率放大电路：主要指标是功率、效率、非线性失真。

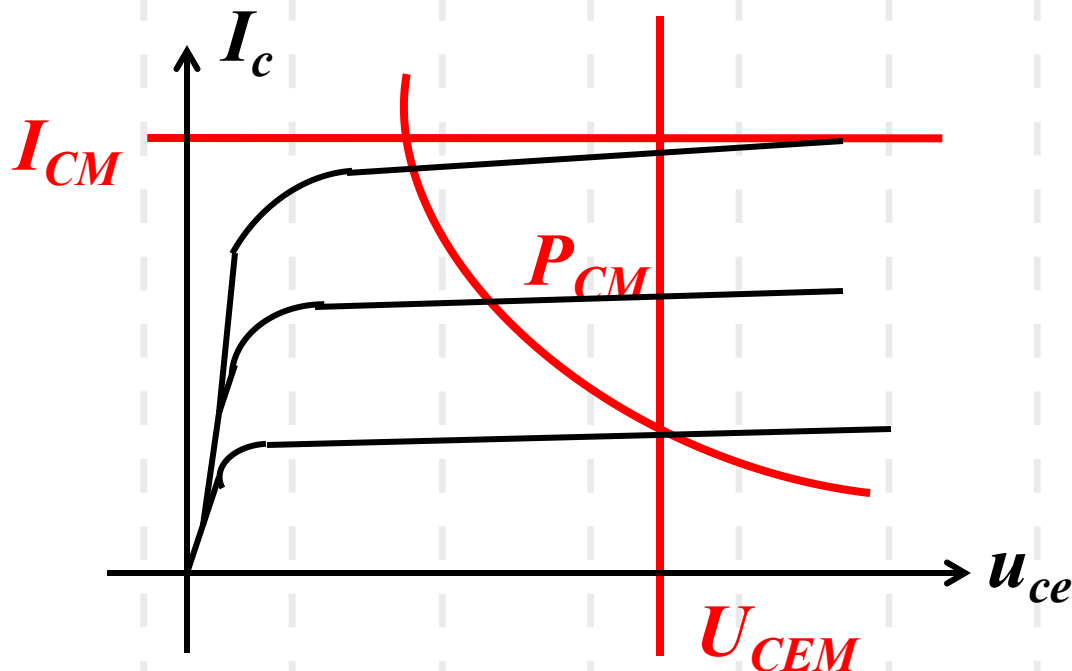
(4). 研究方法不同

电压放大电路：图解法、等效电路法

功率放大电路：图解法

3.功率放大电路的特殊问题

(1)提高功率：在不失真情况下能输出尽可能大的功率，晶体管工作在极限状态，功放电路中电流、电压要求都比较大，电路参数不能超过晶体管的极限值： I_{CM} 、 U_{CEM} 、 P_{CM} 。





(2)提高效率:

电源提供的能量尽可能地转换给负载，以减少晶体管及线路上的损失。

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

$P_{o\max}$: 负载上得到的交流信号功率。

P_E : 电源提供的直流功率。



(3)减小失真:

由于功率放大器处于大信号工作状态，输出电压和电流的变化幅度较大，有可能超出特性曲线的线性范围，不可避免地产生非线性失真。输出功率和非线性失真成为一对主要矛盾。

(4)散热保护:

相当大的功率消耗在功放管的集电结上，使集电结和管壳温度升高。良好的散热成为提高输出功率的一个重要环节。

4 功率放大器的分类

三极管根据正弦信号整个周期内的导通情况，可分为几个工作状态：

甲类：一个周期内均导通

乙类：导通角等于 180°

甲乙类：导通角大于 180°

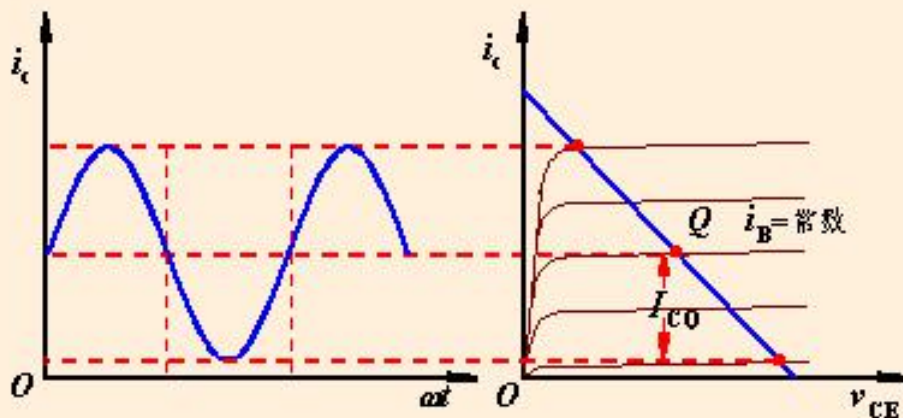
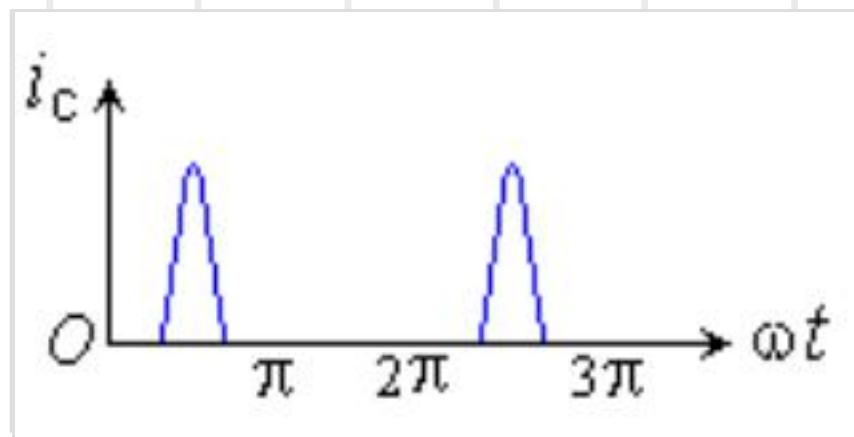
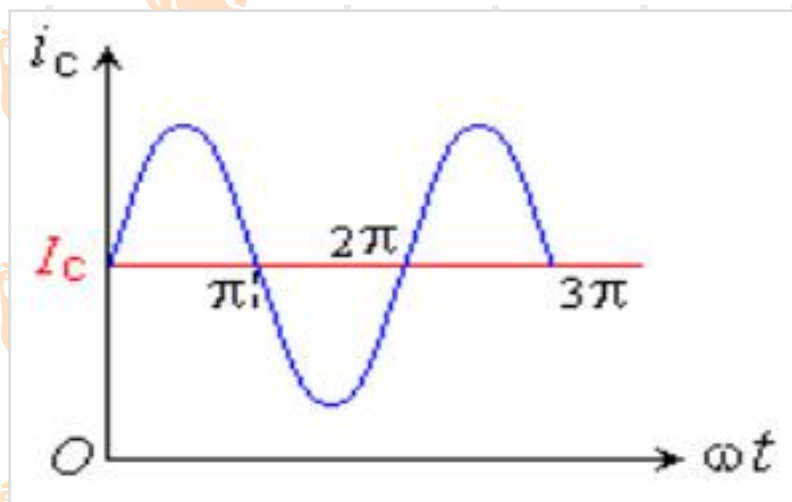


图 5.1.1 Q 点下移对放大电路工作状态的影响

丙类：导通角小于 180°



用哪种组态的电路作功率放大电路最合适？

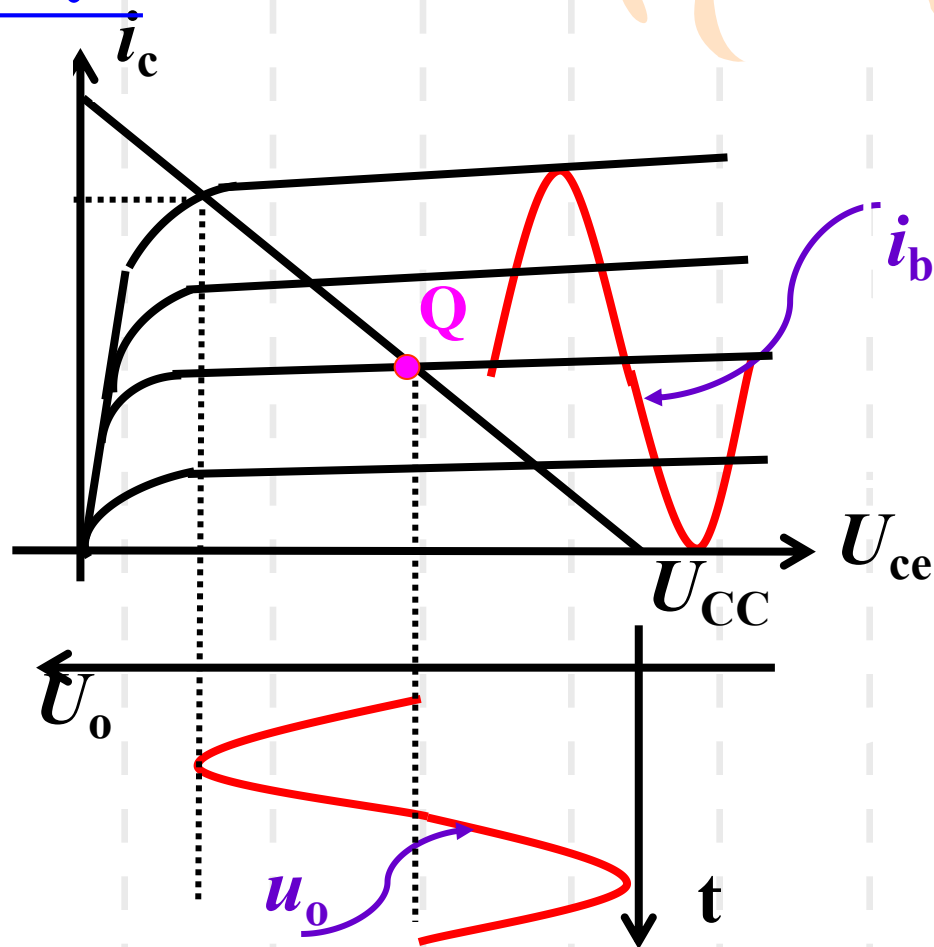
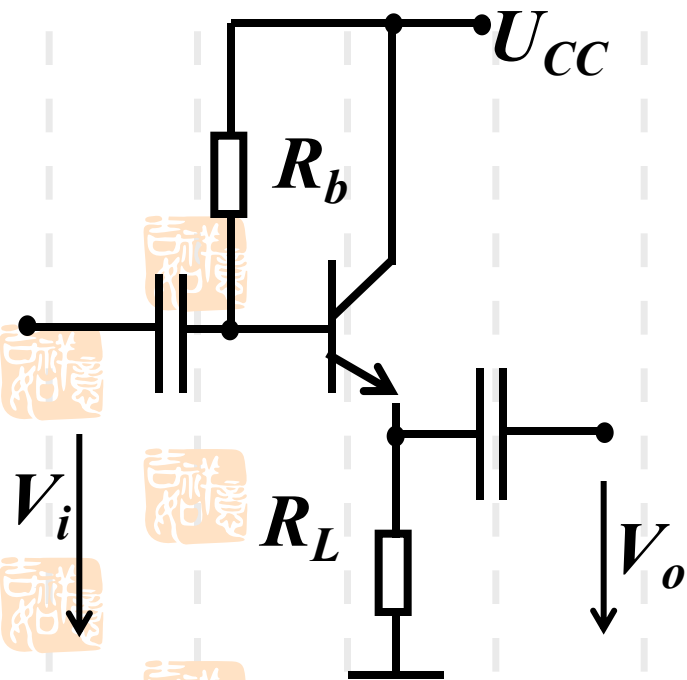
问题讨论:

射极输出器输出电阻低，带负载能力强，可以用做功率放大器吗？



估算射极输出器的效率：

(设 $R_L = R_E$)



为得到较大的输出信号，将静态工作点（Q）设置在负载线的中部，令信号波形正负半周均不失真。

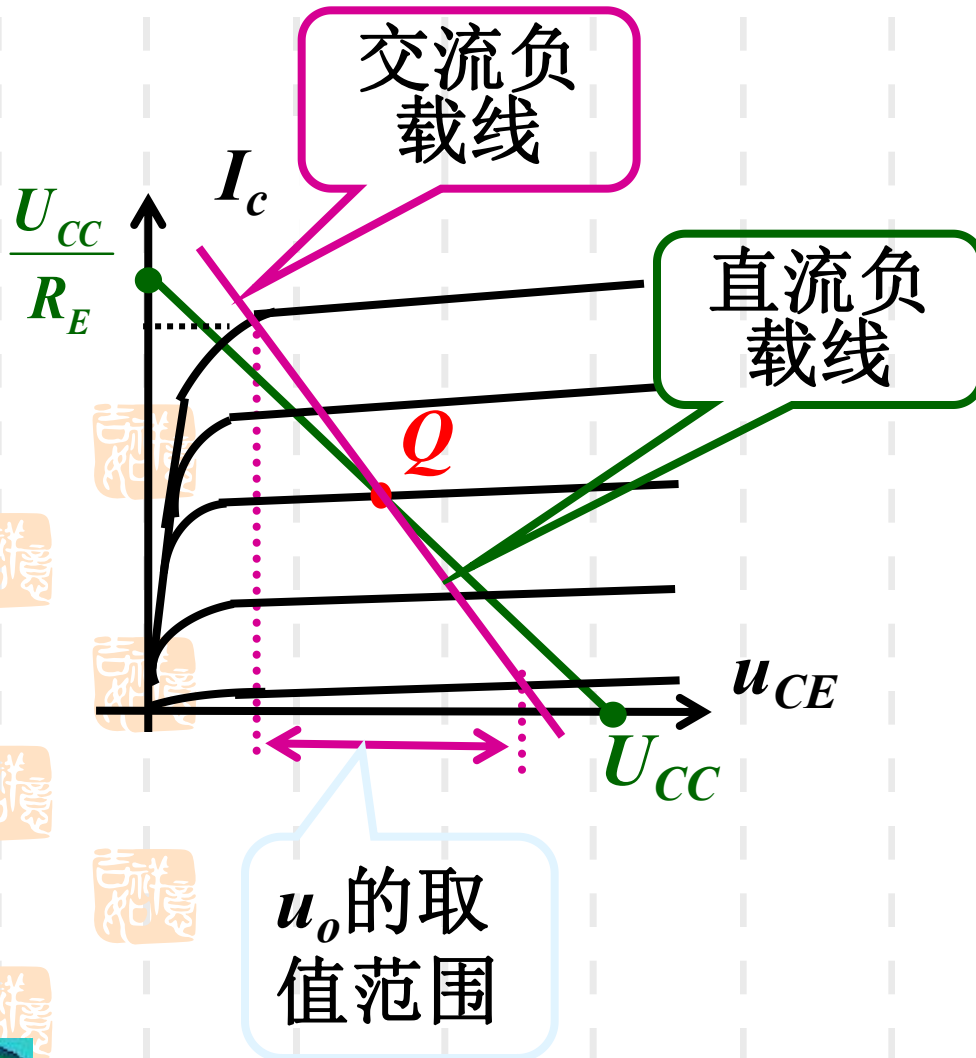
静态工作点：

$$U_{CEQ} = 0.5U_{CC}$$

$$I_{CQ} = 0.5U_{CC} / R_E$$

若忽略晶体管的饱和压降和截止区，输出信号 u_o 的峰值最大只能为：

$$U_{omax} = 0.5U_{CC}$$



1. 直流电源输出的功率

$$i_c = I_{CQ} + i_c$$

$$= I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t$$

($R_L = R_E$ 时)

$$P_E = \frac{1}{T} \int_0^T U_{CC} i_c dt = \frac{U_{CC}}{T} \int_0^T i_c dt = U_{CC} \times I_{CQ} = U_{CC}^2 / 2R_L$$

2. 最大负载功率

$$P_{Omax} = \frac{(U_{om} / \sqrt{2})^2}{R_L} = (0.5U_{CC} / \sqrt{2})^2 / R_L = U_{CC}^2 / 8R_L$$

3. 最大效率

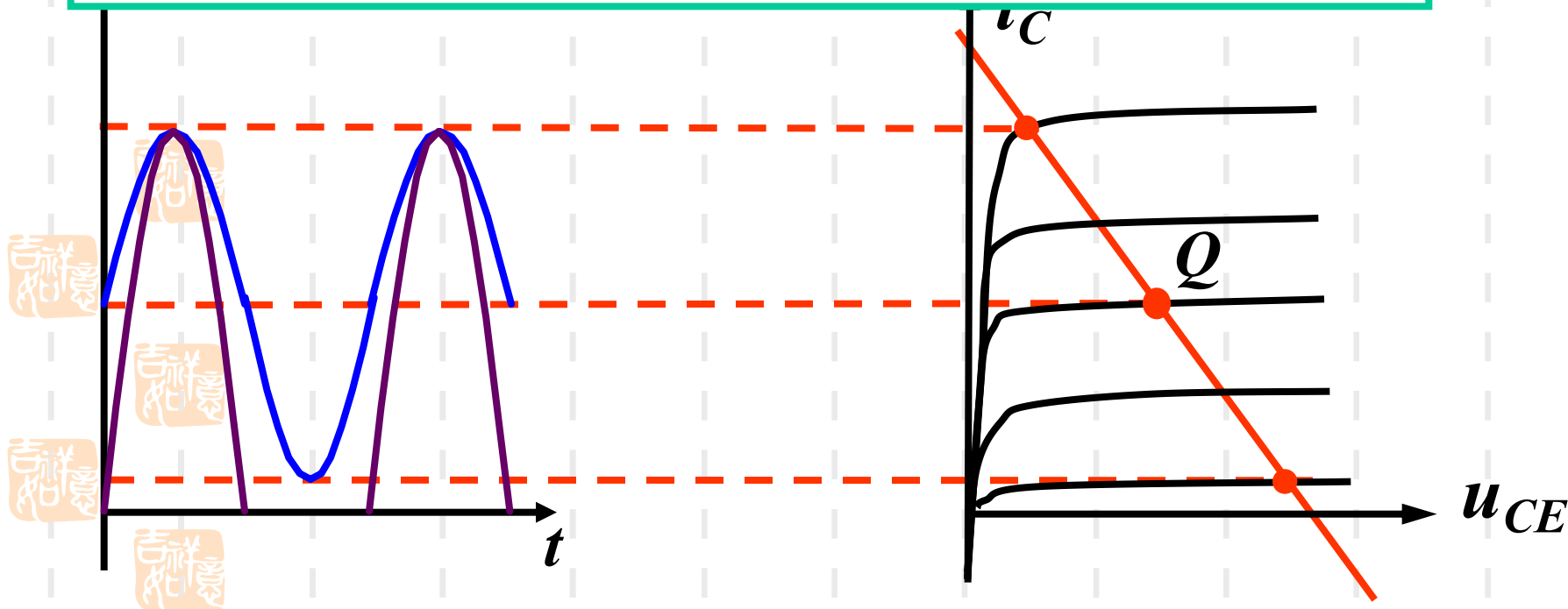
晶体管在整个信号周期内工作的方式称为甲类放大。

射极输出器不适合用做功率放大器。

如何解决效率低的问题？

既降低Q点又不会引起截止失真的办法：

采用推挽输出电路，或互补对称射极输出器。



缺点：但又会引起截止失真。

二、互补对称功率放大器

互补对称： 电路中采用两支晶体管，NPN、PNP各一支；两管特性一致。

类型：

互补对称功放的类型

```
graph TD; A[互补对称功放的类型] --> B[无输出变压器形式 (OTL电路)]; A --> C[无输出电容形式 (OCL电路)];
```

无输出变压器形式
(OTL电路)

无输出电容形式
(OCL电路)

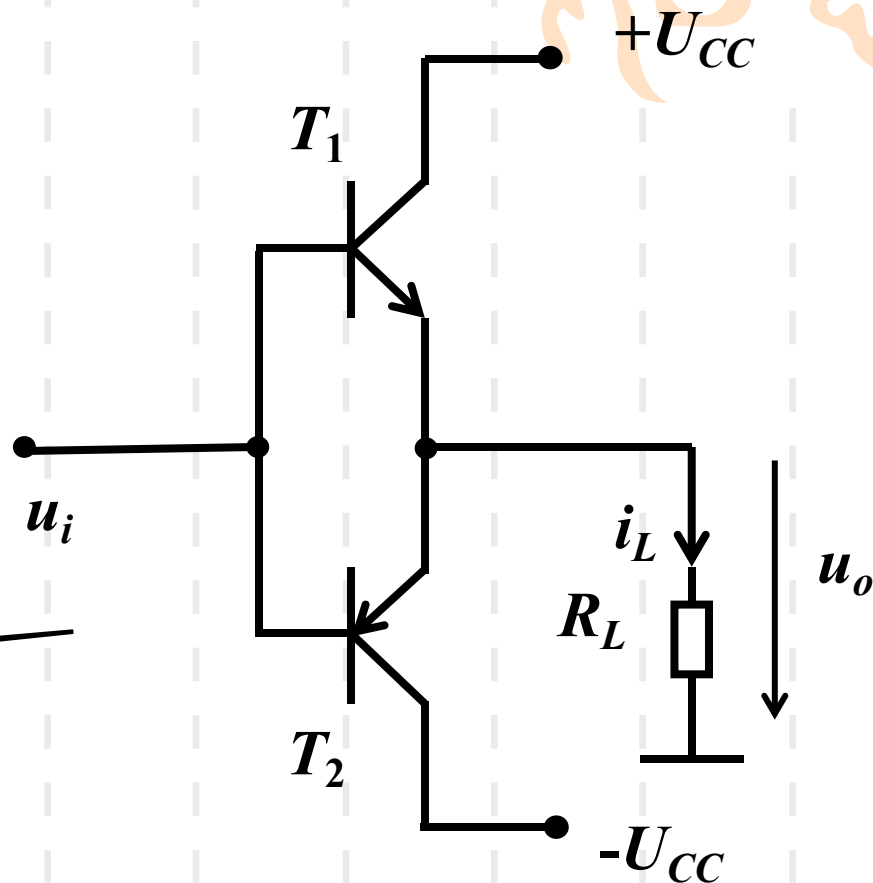
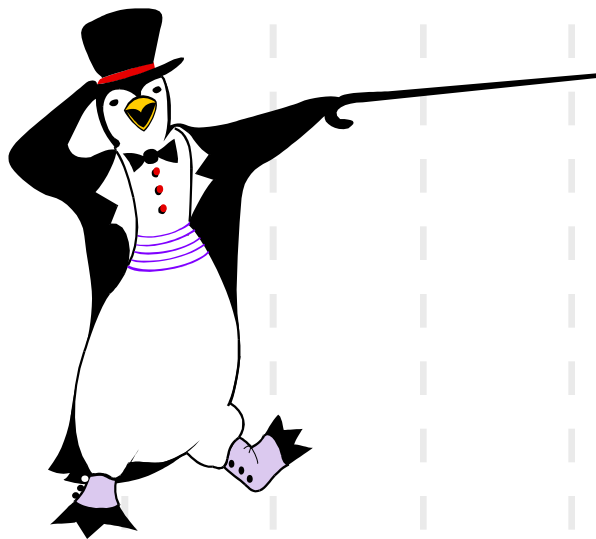
OTL: Output TransformerLess

OCL: Output CapacitorLess

1. 无输出电容的互补对称功放电路 (OCL电路)

电路的结构特点:

- (1) 由NPN型、PNP型三极管构成两个对称的射极输出器对接而成。
- (2) 双电源供电。
- (3) 输入输出端不加隔离电容。



静态分析:

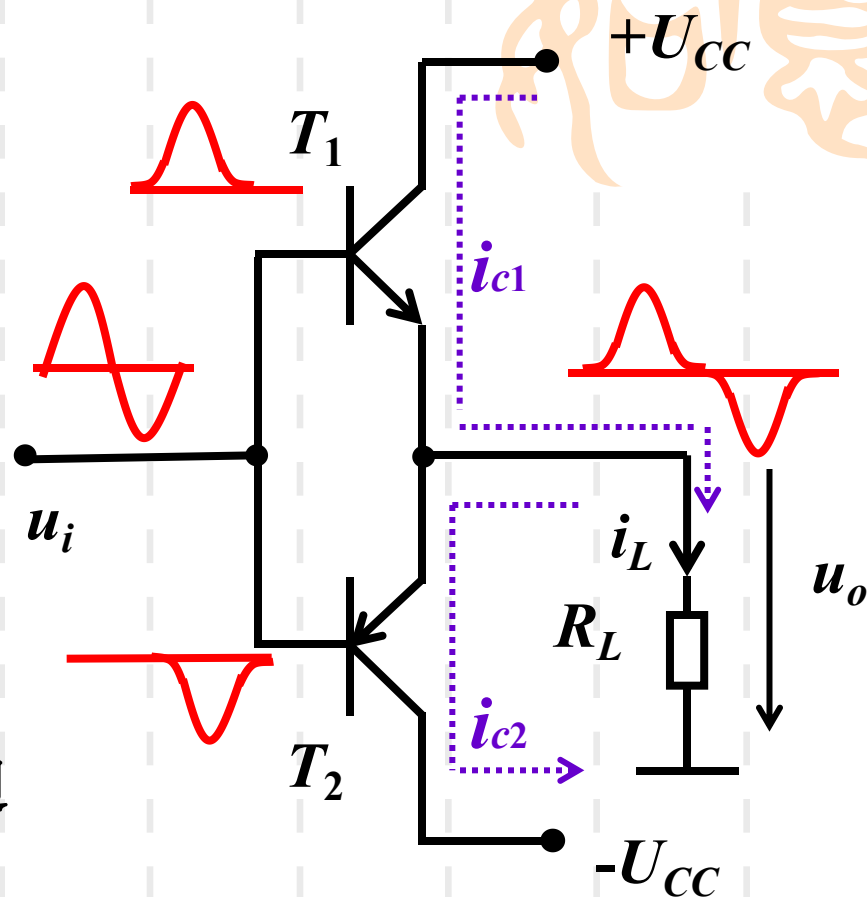
$u_i = 0V \rightarrow T_1、T_2$ 均不工作
 $\rightarrow u_o = 0V$

因此, 不需要隔直电容。

动态分析:

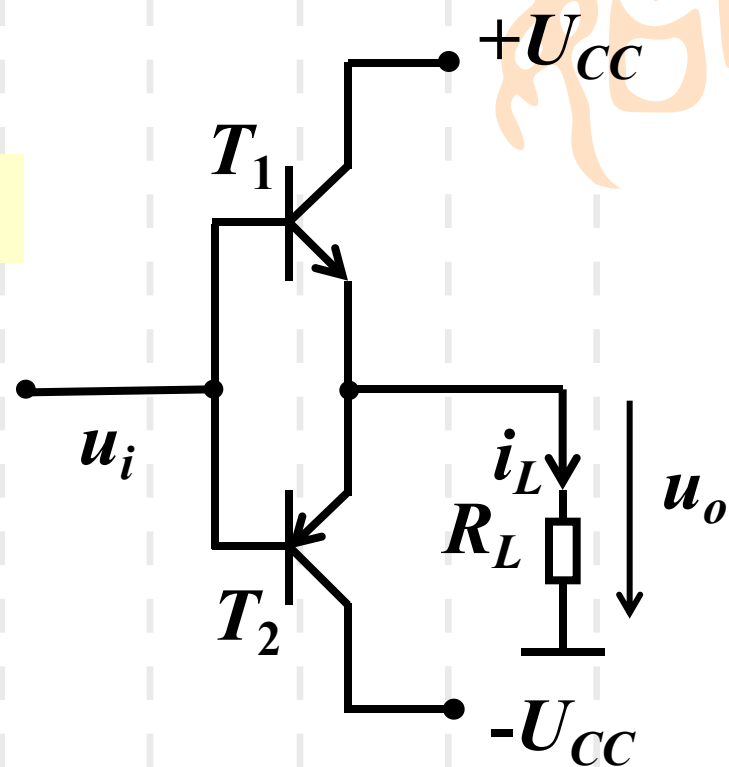
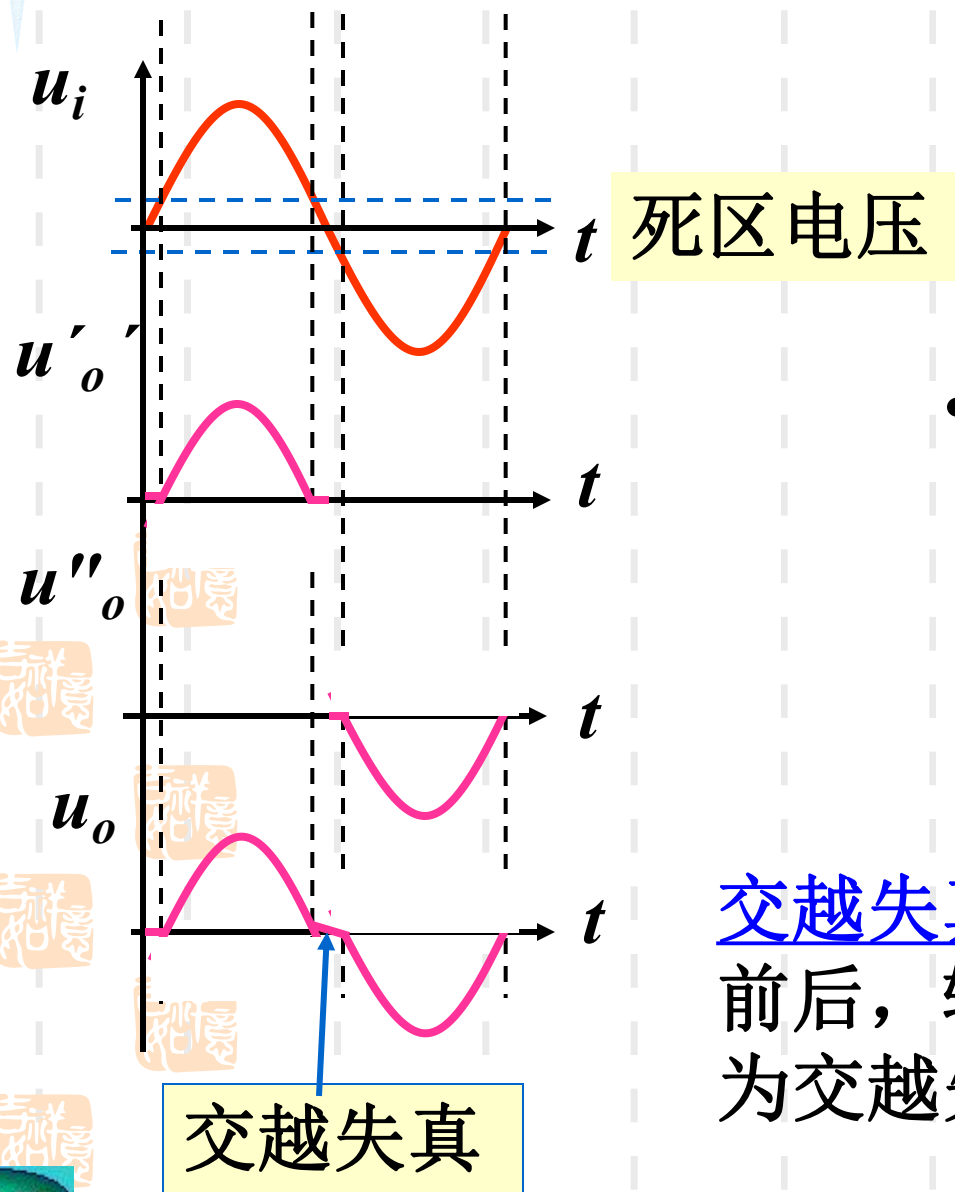
$u_i > 0V \rightarrow T_1$ 导通, T_2 截止
 $\rightarrow i_L = i_{c1}$;

$u_i < 0V \rightarrow T_1$ 截止, T_2 导通
 $\rightarrow i_L = i_{c2}$

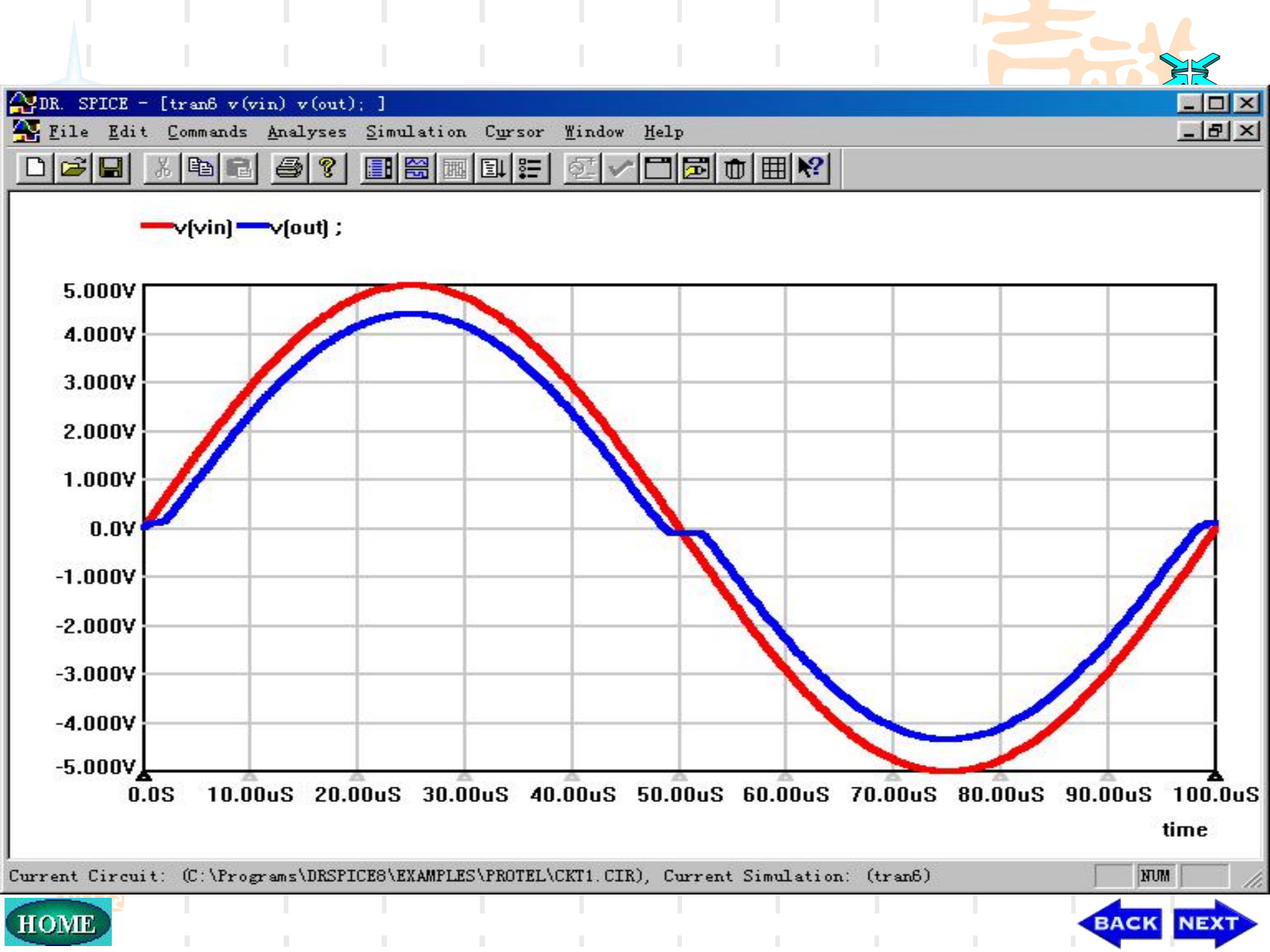


$T_1、T_2$ 两个晶体管都只在半个周期内工作的方式, 该电路也属于乙类放大。

乙类放大的输入输出波形关系:



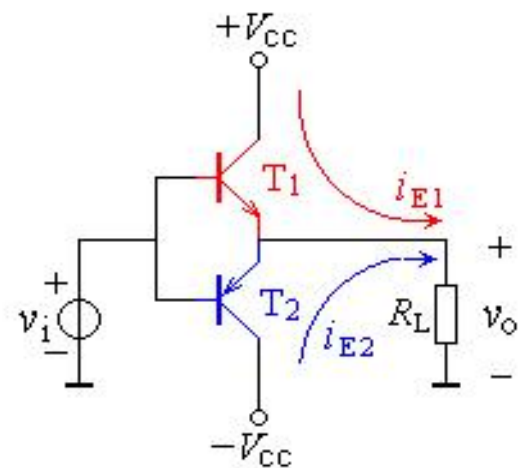
交越失真: 输入信号 u_i 在过零前后, 输出信号出现的失真便为交越失真。



OCL功率放大器的效率计算

最大输出功率

$$P_{om} = \frac{I_{om}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{om}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$



两管管耗

$$\begin{aligned} P_T &= 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (U_{CC} - u_o) \frac{u_o}{R_L} d(\omega t) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi (U_{CC} - U_{om} \sin \omega t) \frac{U_{om} \sin \omega t}{R_L} d(\omega t) \\ &= \frac{2}{R_L} \left(\frac{U_{CC} U_{om}}{\pi} - \frac{U_{om}^2}{4} \right) \end{aligned}$$

电源供给的功率 P_E

$U_{om} \approx U_{CC}$ 时,

$$P_E = P_{om} + P_T = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$

计算方法2:

满激励时电源提供最大直流平均功率:

流过每个电源的电流为半个正弦波, 其平均值为:

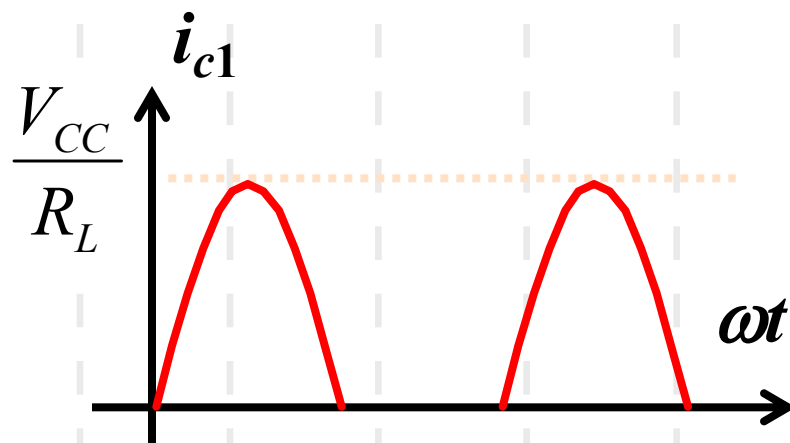
$$I_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_{cm} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_{cm}}{\pi}$$

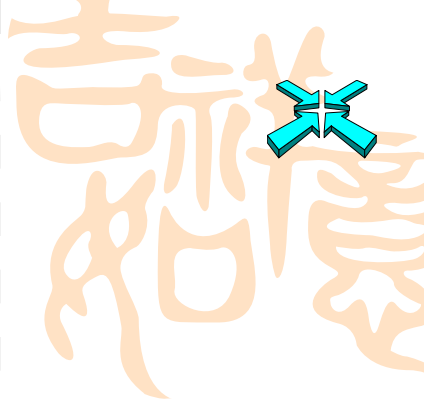
当满激励时

$$I_{cm} = U_{CC} / R_L$$

则两个电源提供的总功率为:

$$P_{CC\max} = P_{C1\max} + P_{C2\max} = 2U_{CC} \cdot \frac{U_{CC}}{\pi R_L} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{CC}^2}{R_L}$$




$$P_{\text{om}} = \frac{I_{\text{om}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\text{om}}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{om}}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{\text{CC}}^2}{R_L}$$

$$P_E = P_o + P_T = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{\text{CC}}^2}{R_L}$$

效率为

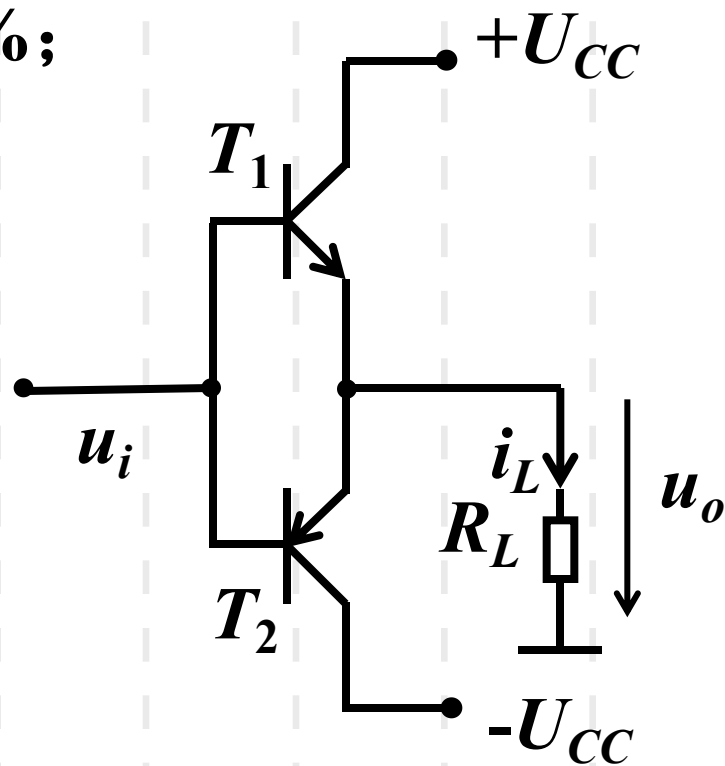

$$\eta = \frac{P_{\text{o m}}}{P_E} = \frac{\pi}{4} = 78.5\%$$



实际电路中存在饱和管压降 U_{CES} ，且静态工作电流 I_C 也不为零，因此输出效率一般小于78.5%。

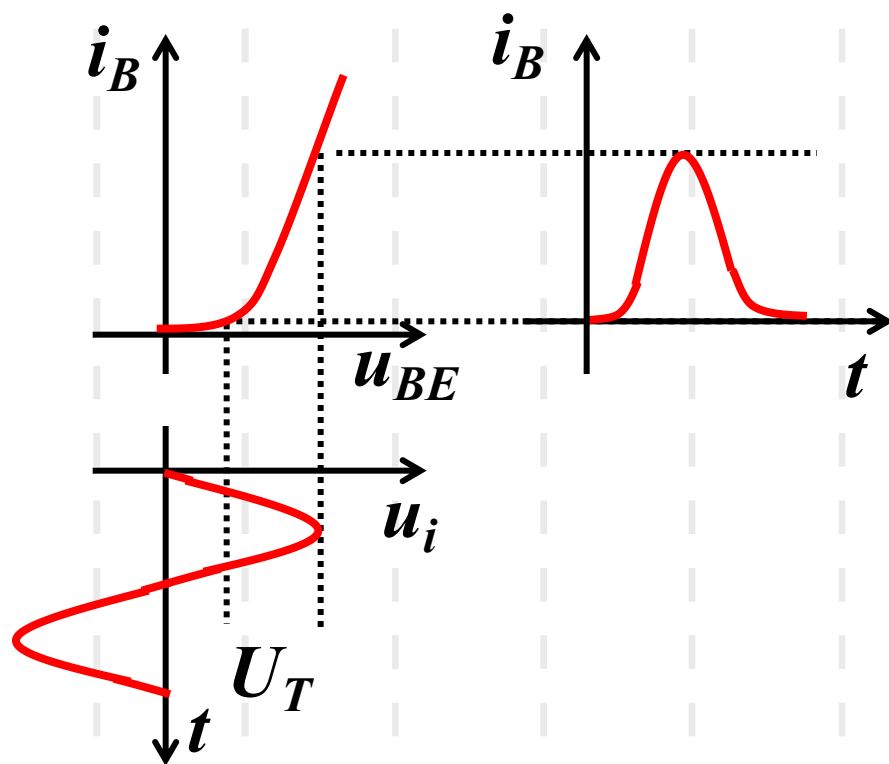
乙类放大的特点：

- (1) 静态电流 I_{CQ} 、 I_{BQ} 等于零；
- (2) 每管导通时间等于半个周期；
- (3) 效率较高，理论值78.5%；
- (4) 存在交越失真。



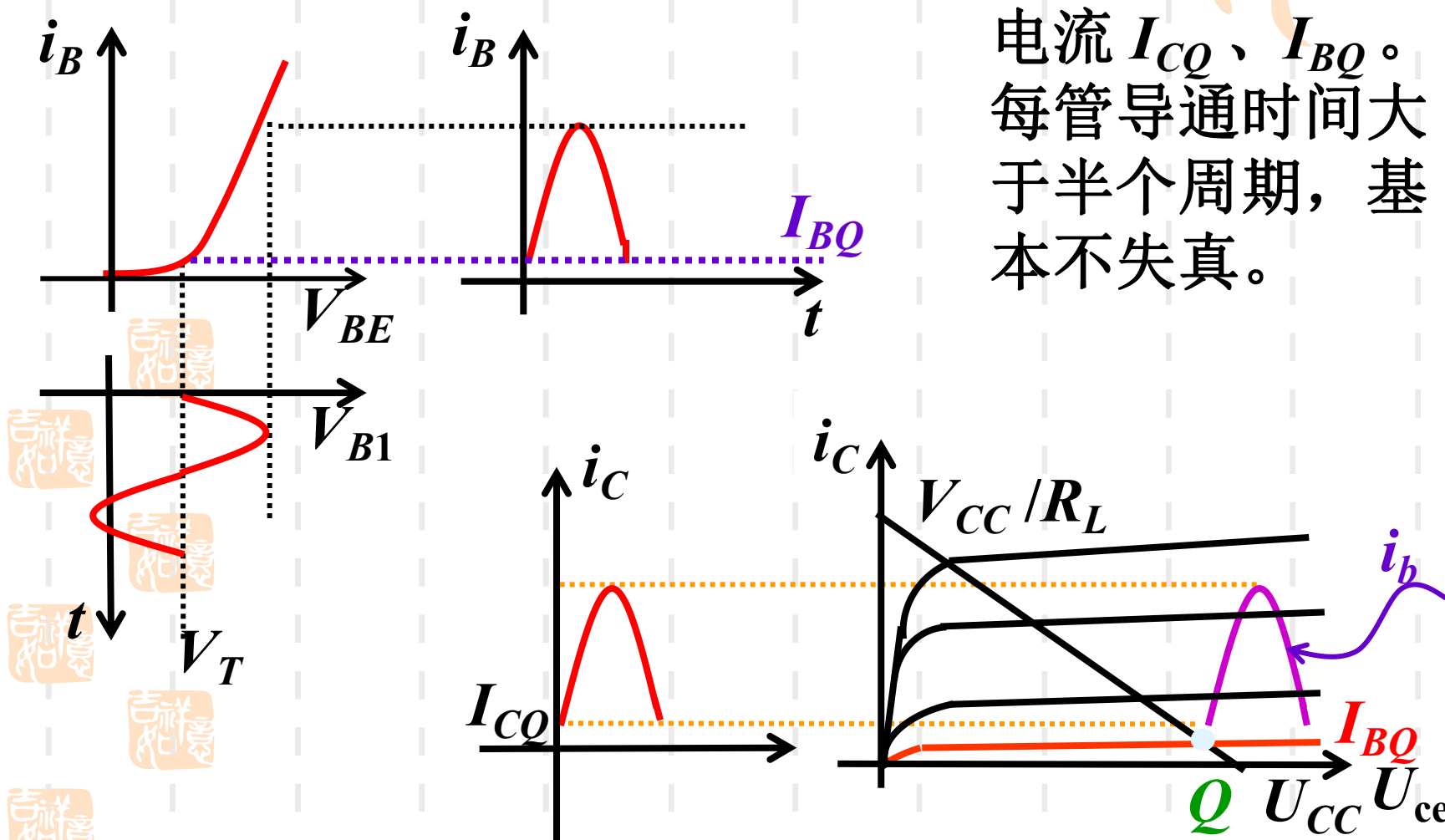
克服交越失真

交越失真产生的原因： 在于晶体管特性存在非线性， $v_i < v_T$ 时晶体管截止。



甲乙类放大的波形关系：

特点：存在较小的静态电流 I_{CQ} 、 I_{BQ} 。每管导通时间大于半个周期，基本不失真。

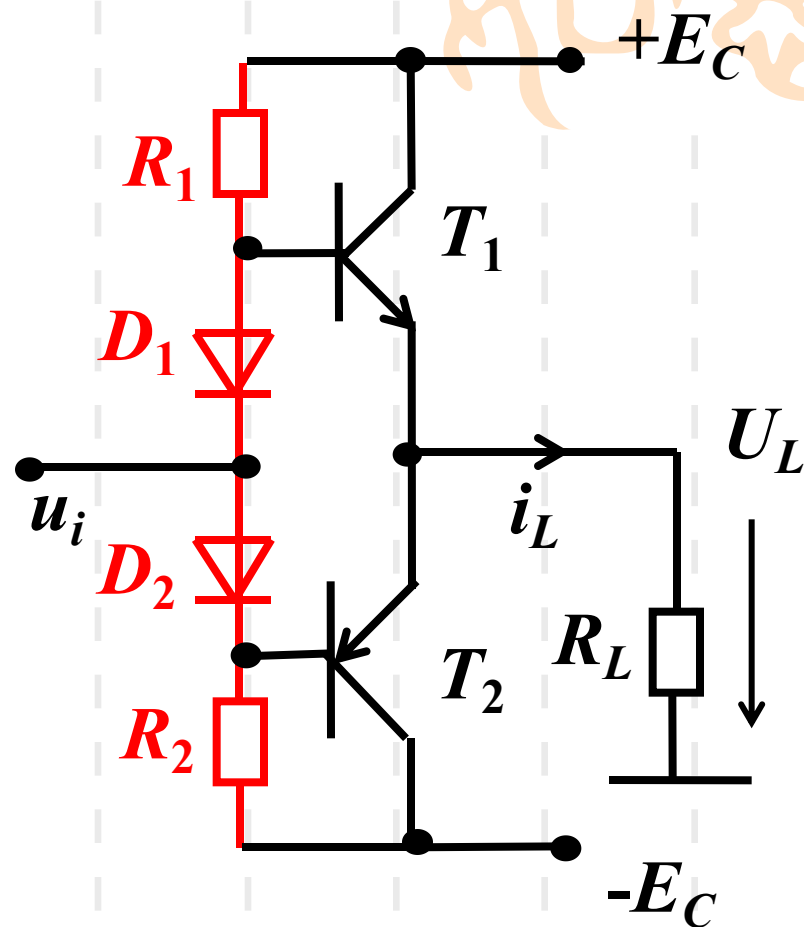


克服交越失真的措施:

电路中增加 R_1 、 D_1 、 D_2 、 R_2 支路。

静态时

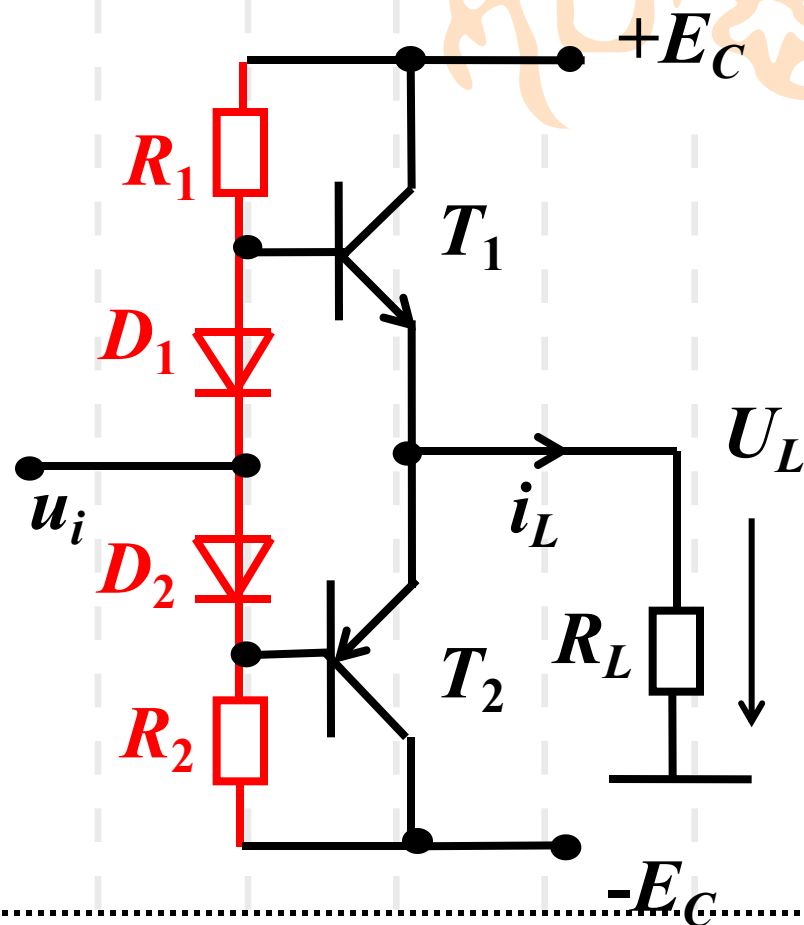
T_1 、 T_2 两管发射结电位分别为二极管 D_1 、 D_2 的正向导通压降，致使两管均处于临界导通状态。



动态时

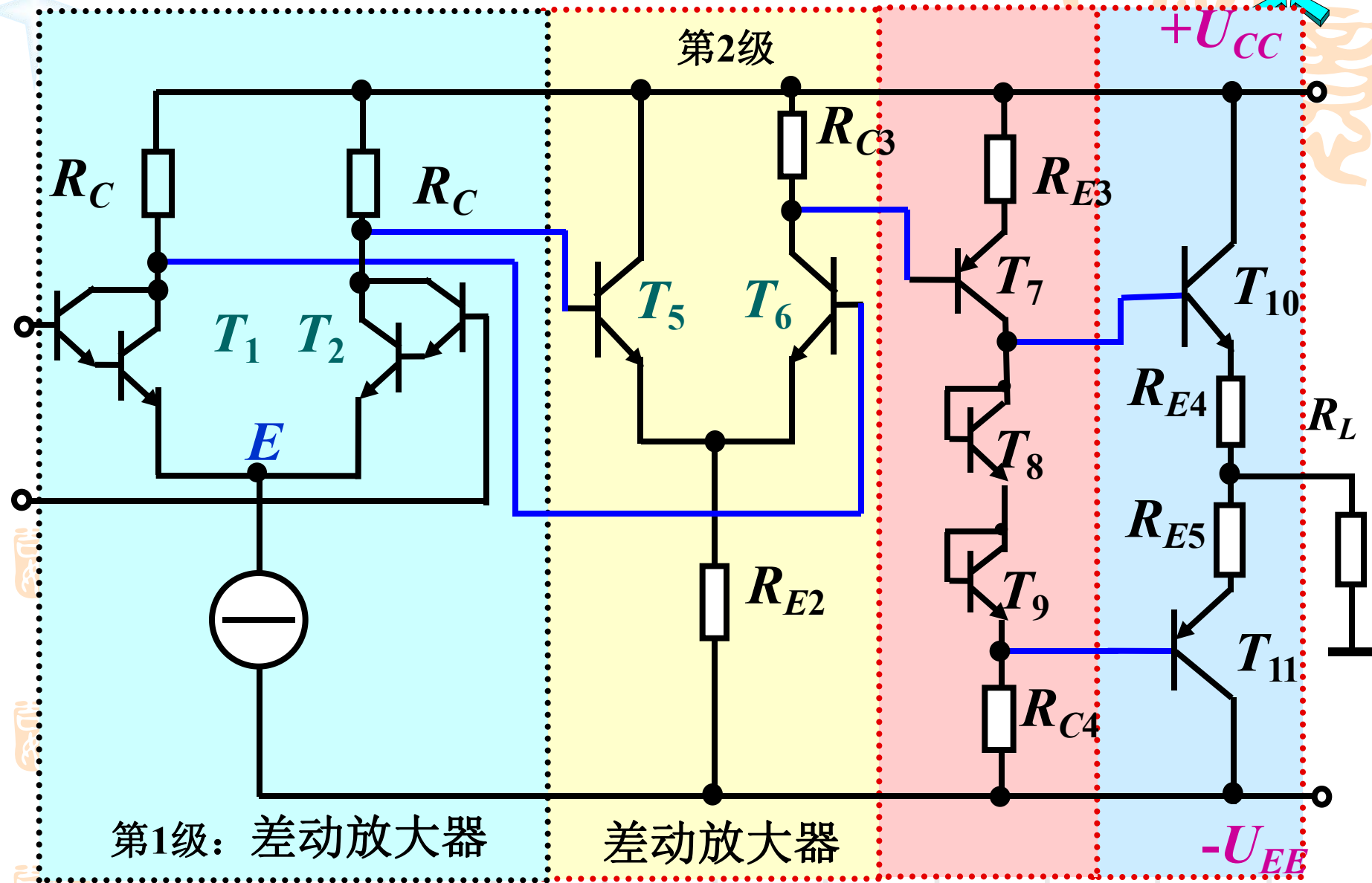
正半周, T_2 截止, T_1 进入良好的导通状态;

负半周, T_1 截止, T_2 进入良好的导通状态。从而克服死区电压的影响, 去掉交越失真。



两管导通时间均比半个周期大一些的工作方式称为“**甲乙类放大**”。

集成运放内部的功率放大输出级



第3级: 单管放大器

第4级: 互补对称射极跟随器

2. 无输出变压器的互补对称功放电路 (OTL电路)

特点

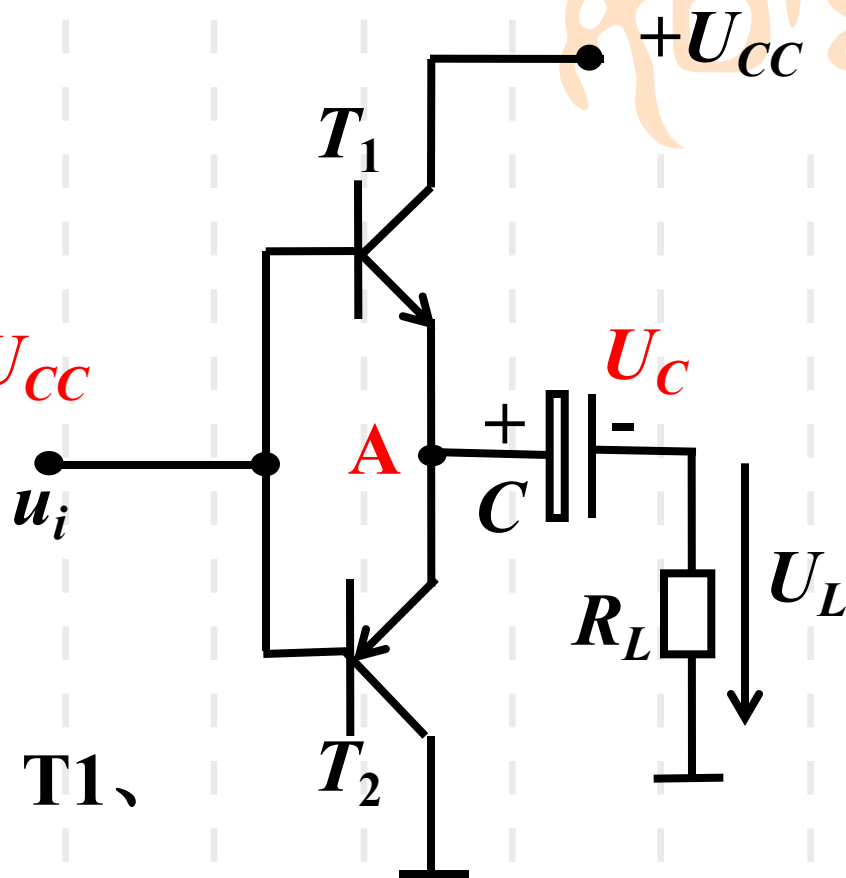
- (1) 单电源供电;
- (2) 输出加有大电容。

静态分析

$$\text{令: } u_i = \frac{U_{CC}}{2}$$

u_i 通过 T_1 对电容 C 充电, T_1 、 T_2 特性对称,

$$\therefore U_A = \frac{U_{CC}}{2}, U_C = \frac{U_{CC}}{2}$$



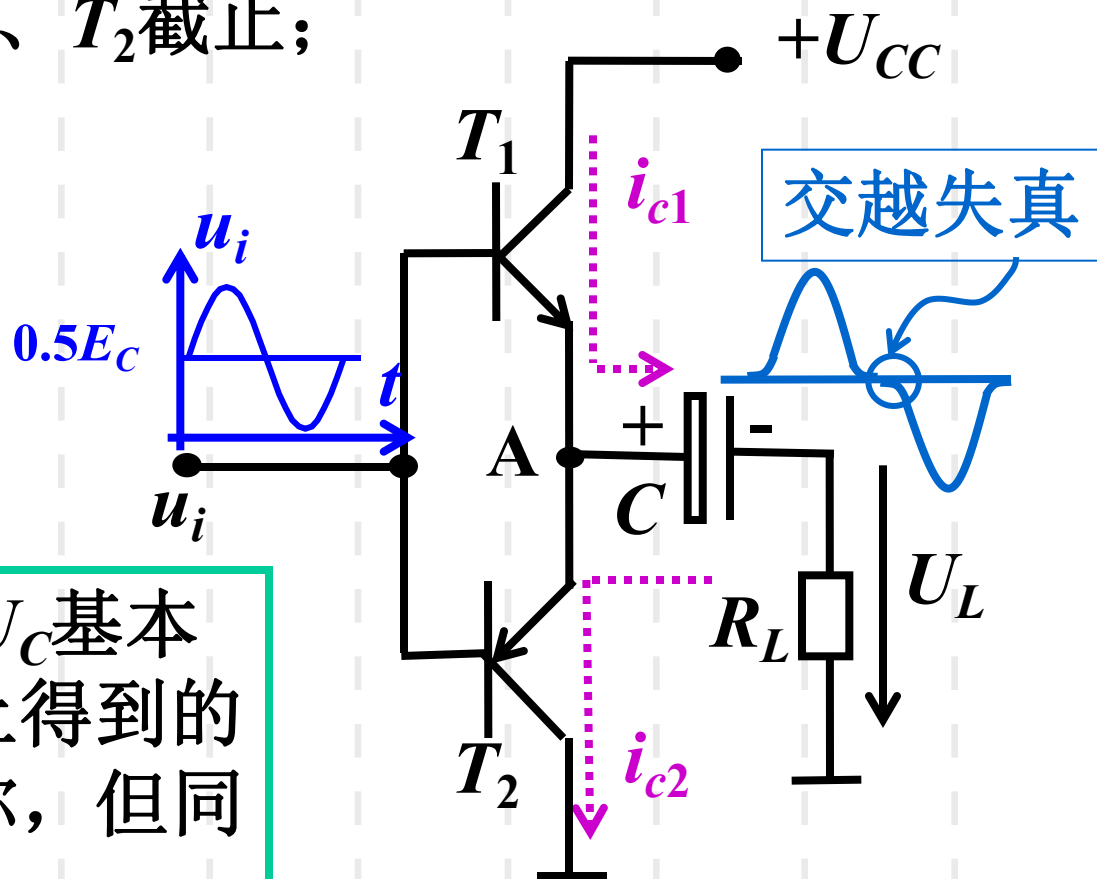
动态分析

设输入端在 $0.5U_{CC}$ 直流电平基础上加入正弦信号。

$u_i > \frac{U_{CC}}{2}$ 时, T_1 导通、 T_2 截止;

$u_i < \frac{U_{CC}}{2}$ 时,
 T_1 截止、 T_2 导通。

若输出电容足够大, U_C 基本保持在 $0.5U_{CC}$, 负载上得到的交流信号正负半周对称, 但同样存在交越失真。

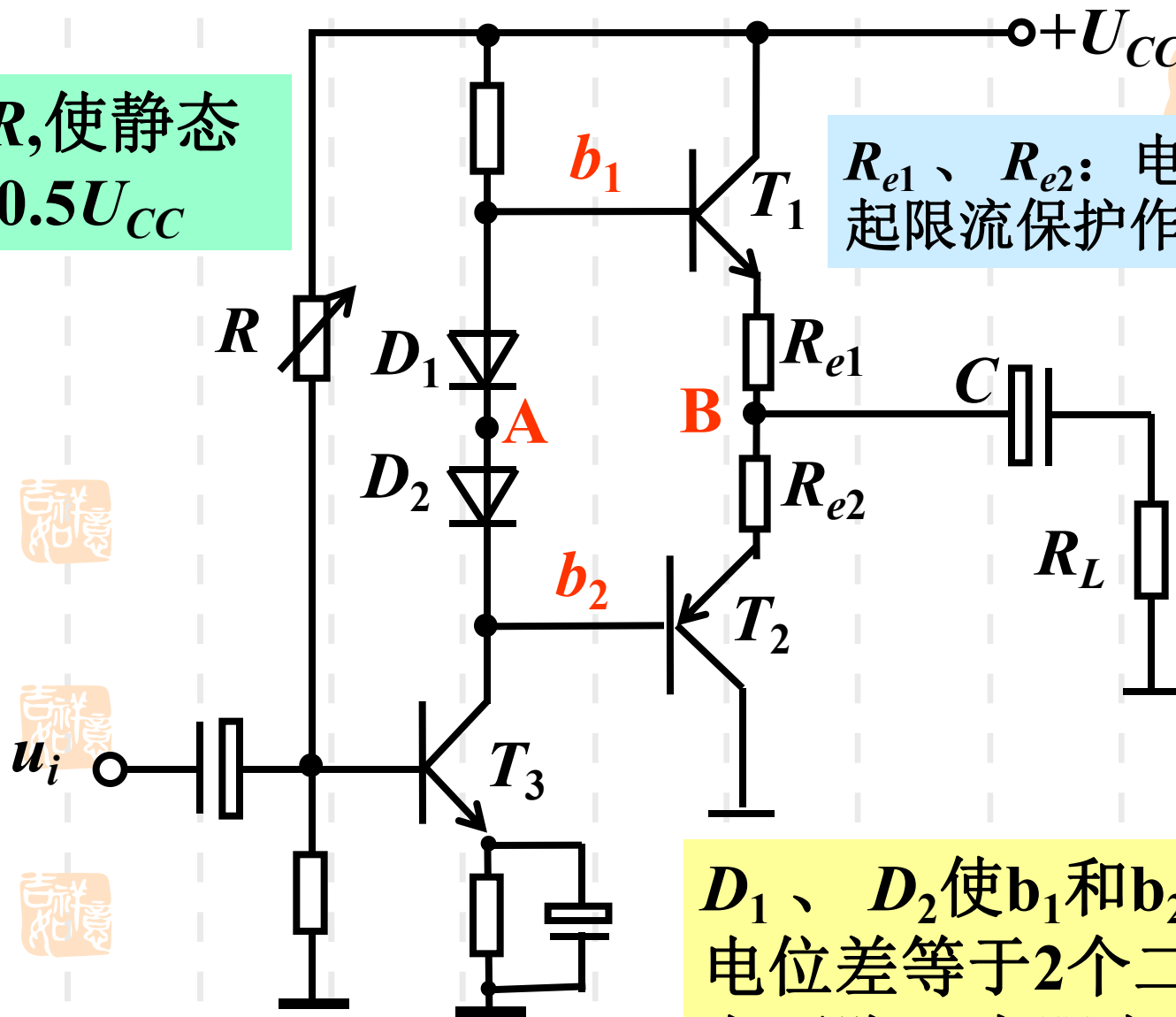


实用OTL互补输出功放电路



调节 R ,使静态
 $U_{AQ}=0.5U_{CC}$

R_{e1} 、 R_{e2} : 电阻值 $1\sim 2\Omega$,
起限流保护作用。



D_1 、 D_2 使 b_1 和 b_2 之间的
电位差等于2个二极管正
向压降，克服交越失真。

三、集成功率放大器

随着半导体集成电路技术的发展，集成功率放大器的应用日益广泛。

特点：工作可靠、使用方便。只需在器件外部适当连线，即可向负载提供一定的功率。

集成功放LM384：

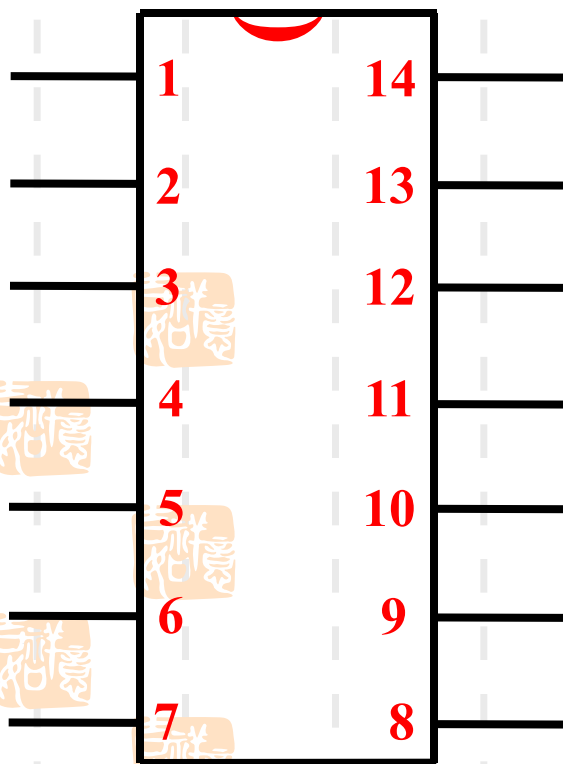
生产厂家：美国半导体器件公司

电路形式：OTL

输出功率：8 Ω 负载上可得到5W功率

电源电压：最大为28V

集成功放 LM384管脚说明:



14 -- 电源端 (V_{cc})

3、4、5、7 -- 接地端 (GND)

10、11、12 -- 接地端 (GND)

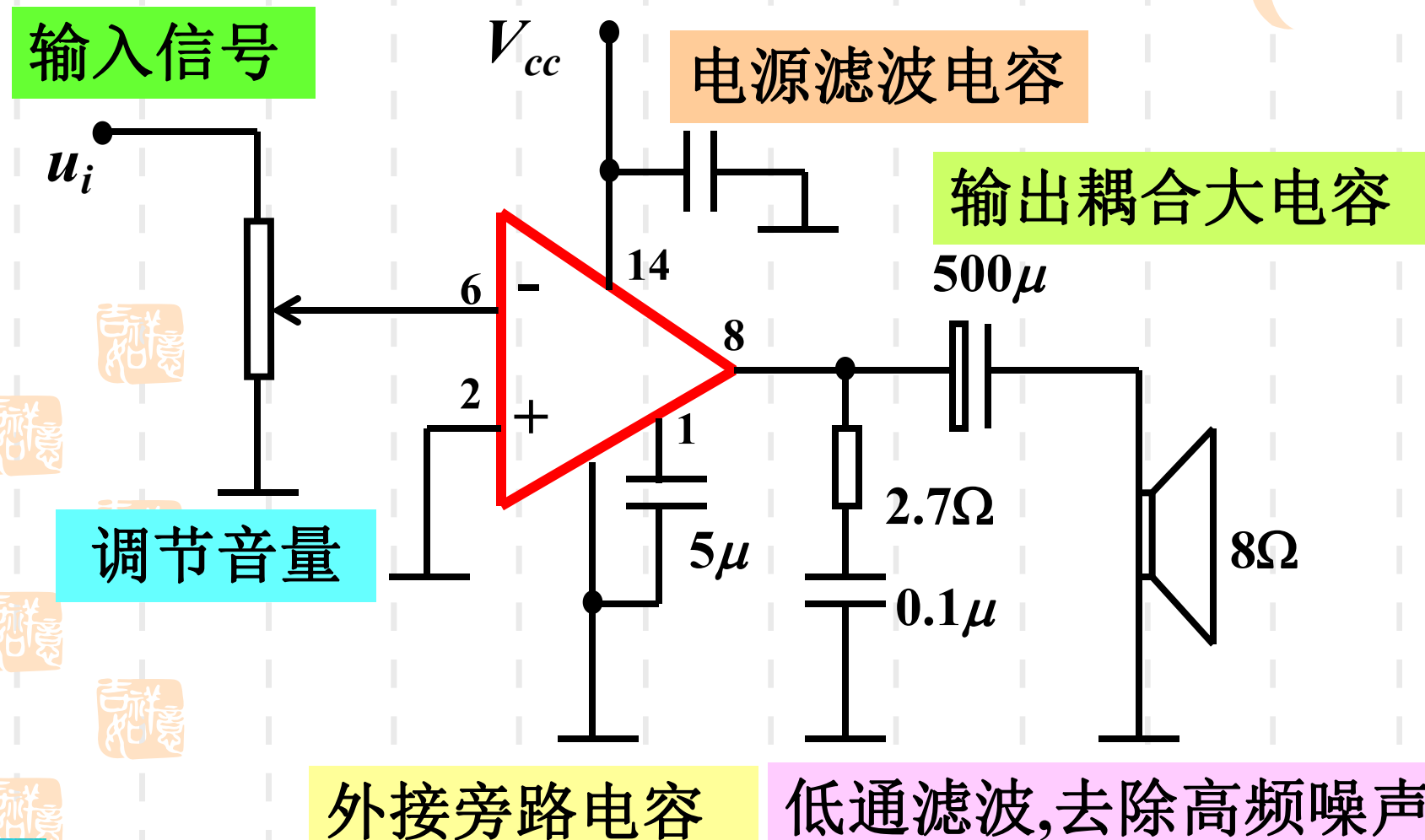
2、6 -- 输入端
(一般2脚接地)

8 -- 输出端
(经 500μ 电容接负载)

1 -- 接旁路电容 (5μ)

9、13 -- 空脚 (NC)

集成功放 LM384 外部电路典型接法:



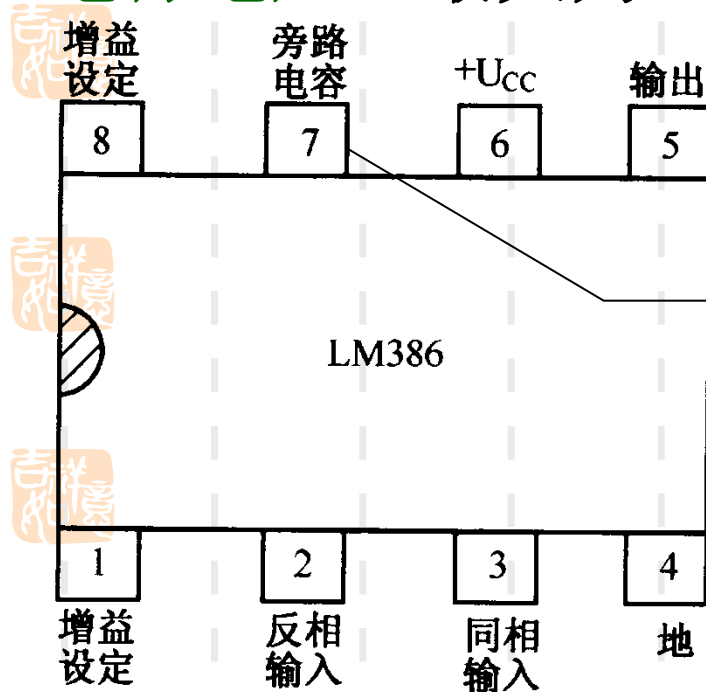
集成功放LM386:

生产厂家: 美国半导体器件公司

电路形式: OTL

输出功率: 32Ω 负载上可得到1W功率

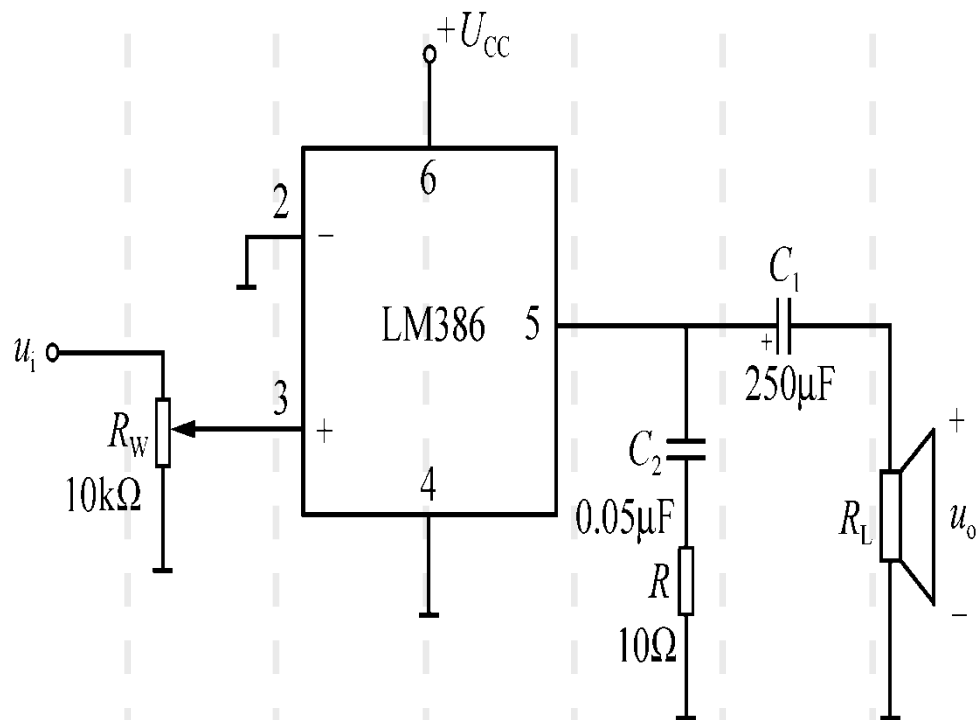
电源电压: 最大为5-18V

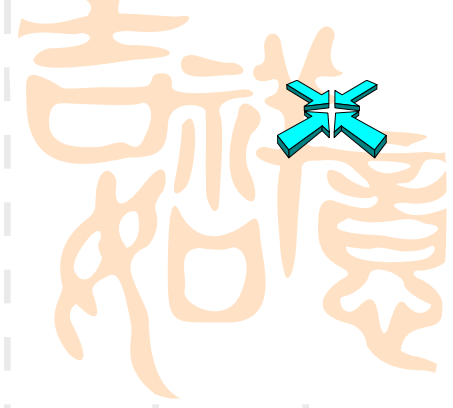


使用时在⑦脚和地之间接旁路电容，其值通常取为 **$10\mu\text{F}$** 。

集成功放 LM386外部电路典型接法

电路的外接元件很少， C_1 为输出电容， R_W 调节音量用， R 和 C_2 串联组成校正网络，以消除自激振荡。当①脚和⑧脚开路时，集成功率放大器的电压放大倍数约为20。





- 作业:
- 3-5, 3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-13 , 3-14





实验电路

