

# 第7章 波形的发生和信号的转换

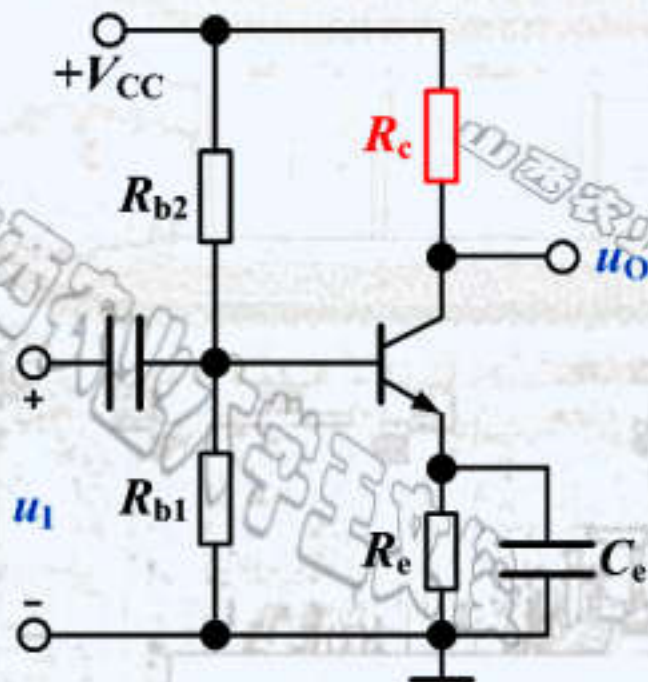
——王文俊

山西农业大学

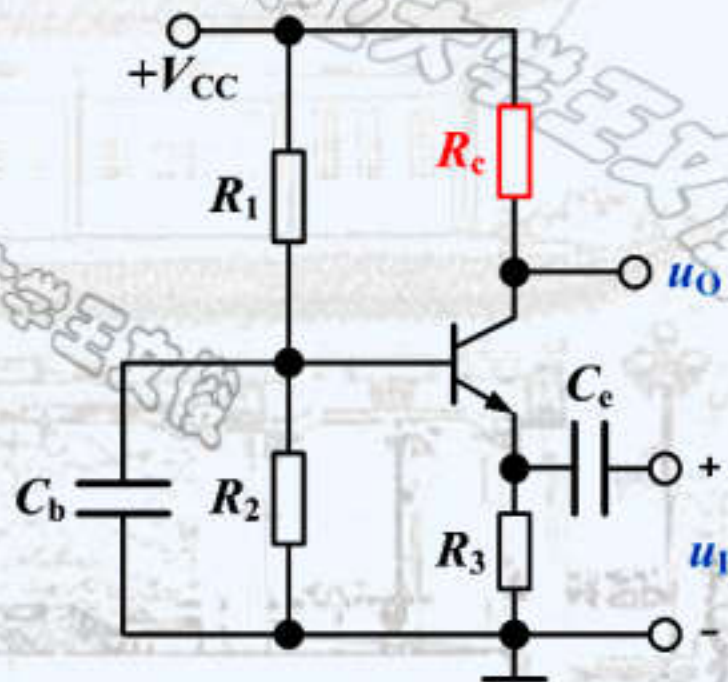
# 十、共基放大电路构成的选频放大电路

## • 1、共基放大电路

由于共基放大电路的频带宽，因此适用于振荡频率较高的场合。

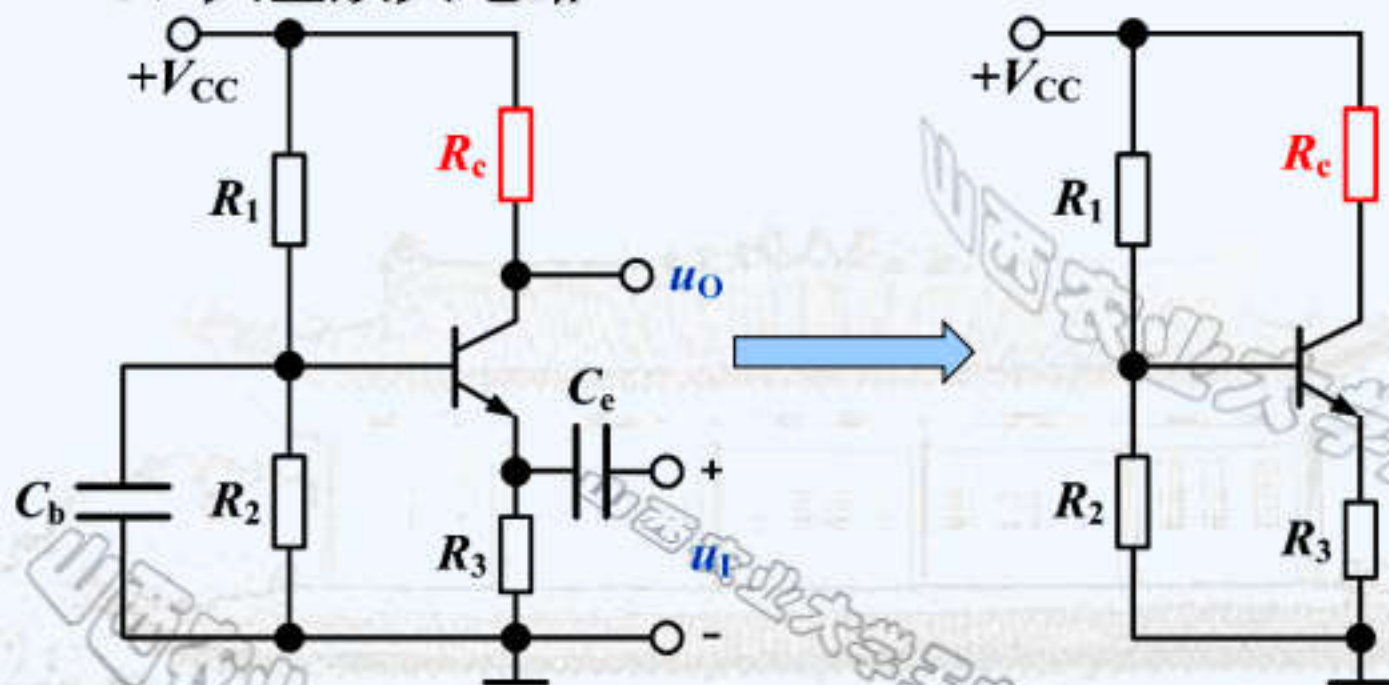


共射放大电路



共基放大电路

# 1、共基放大电路

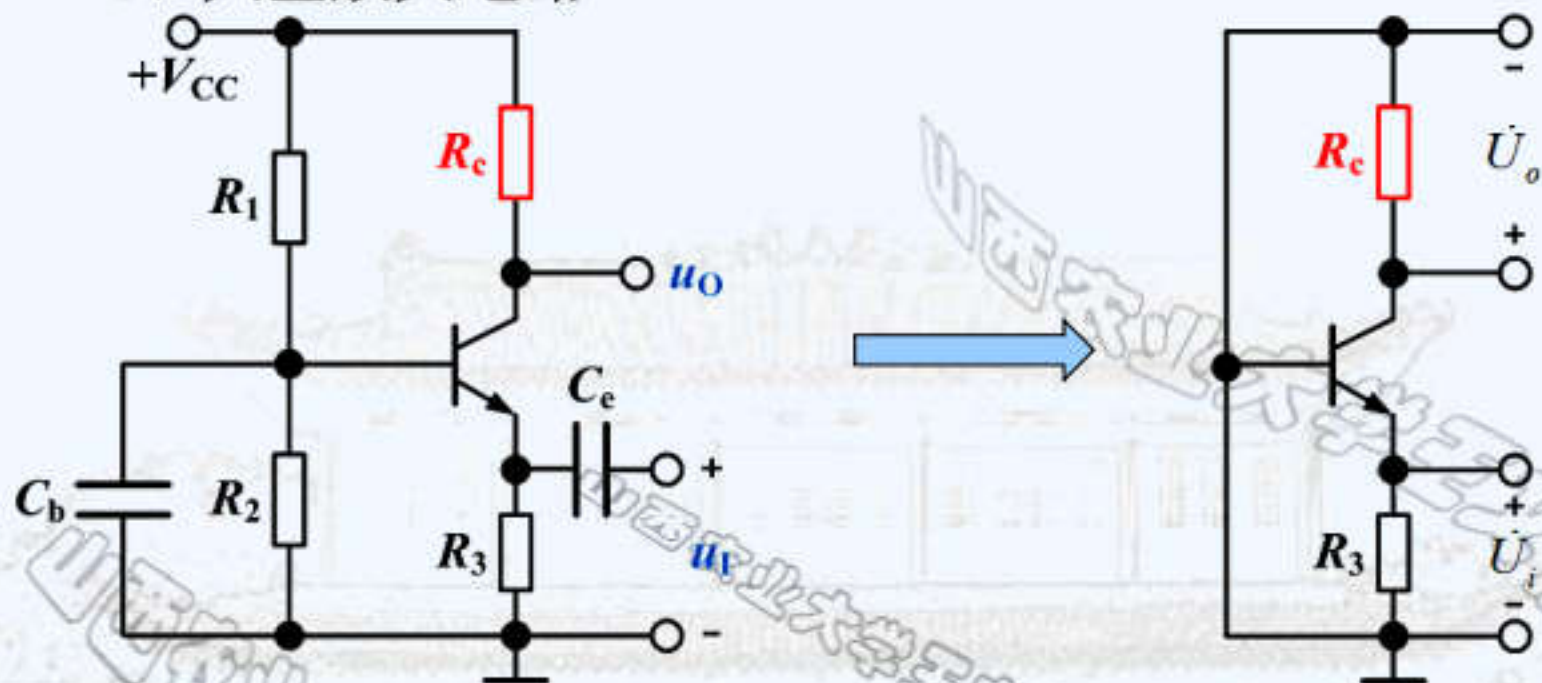


直流通路

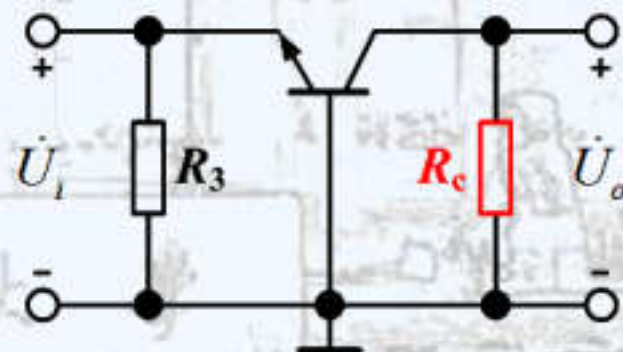
根据直流通路，放大电路为典型的静态工作点稳定电路，可以设置合适的静态工作点。



# 1、共基放大电路



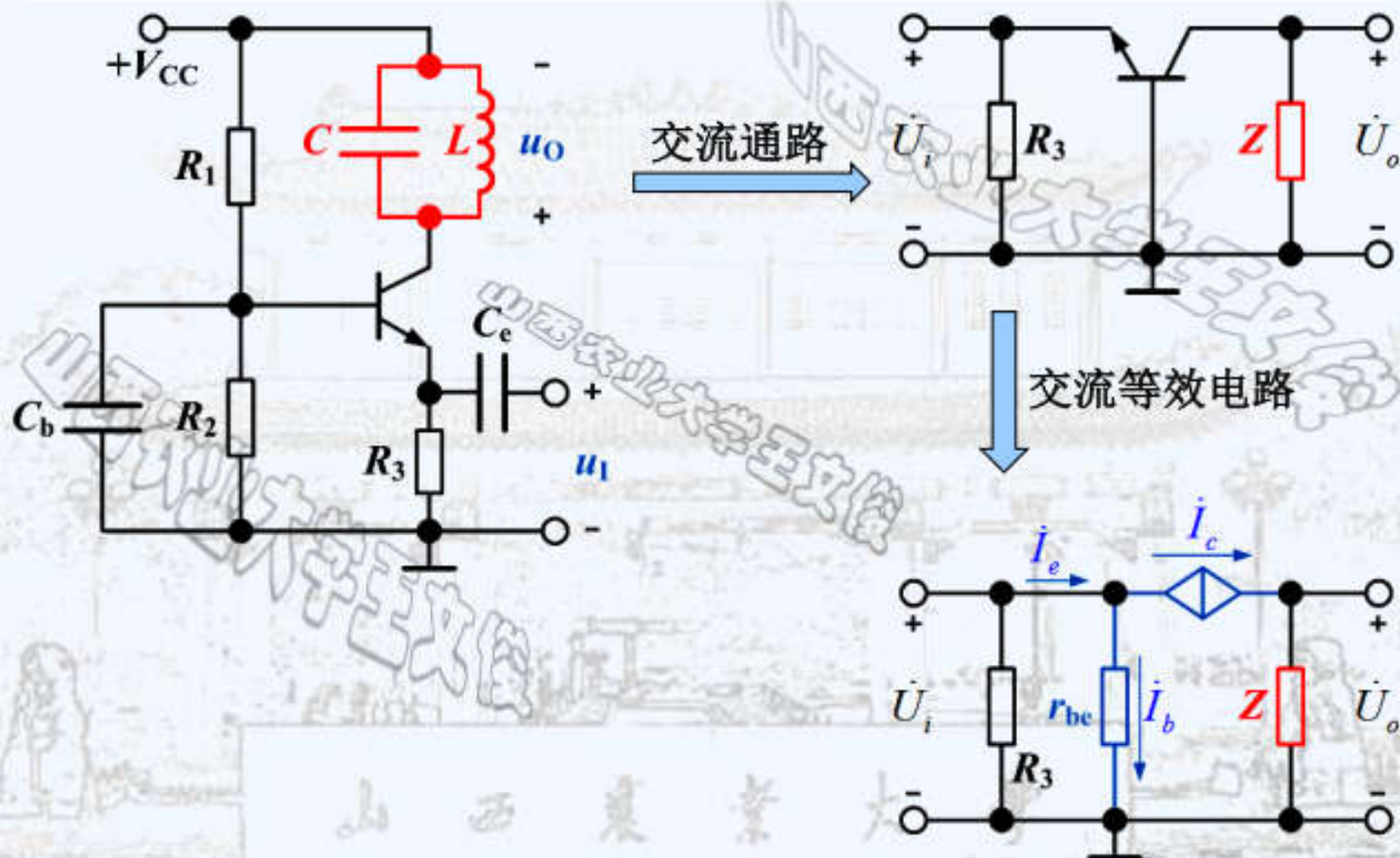
交流通路



根据交流通路，电路为共基放大电路，且交流信号传递过程中无开路或短路现象，电路可以正常放大。

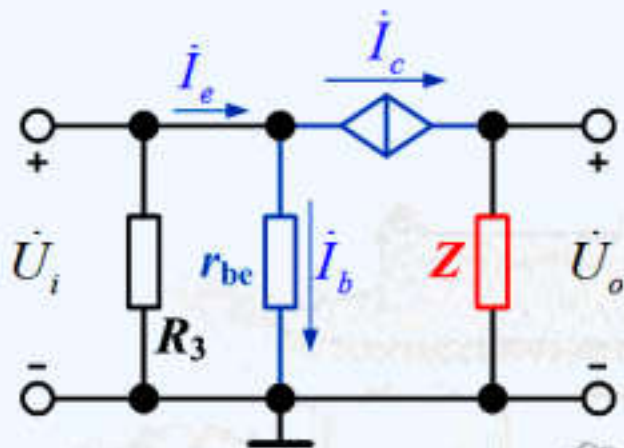
## • 2、选频放大电路

以  $LC$  并联网络作为共基放大电路的集电极负载，构成选频放大电路。





## • 2、选频放大电路



• 输入电压:

$$\dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be}$$

• 输出电压:

$$\dot{U}_o = \dot{I}_c Z = \beta \dot{I}_b Z$$

• 电压放大倍数:

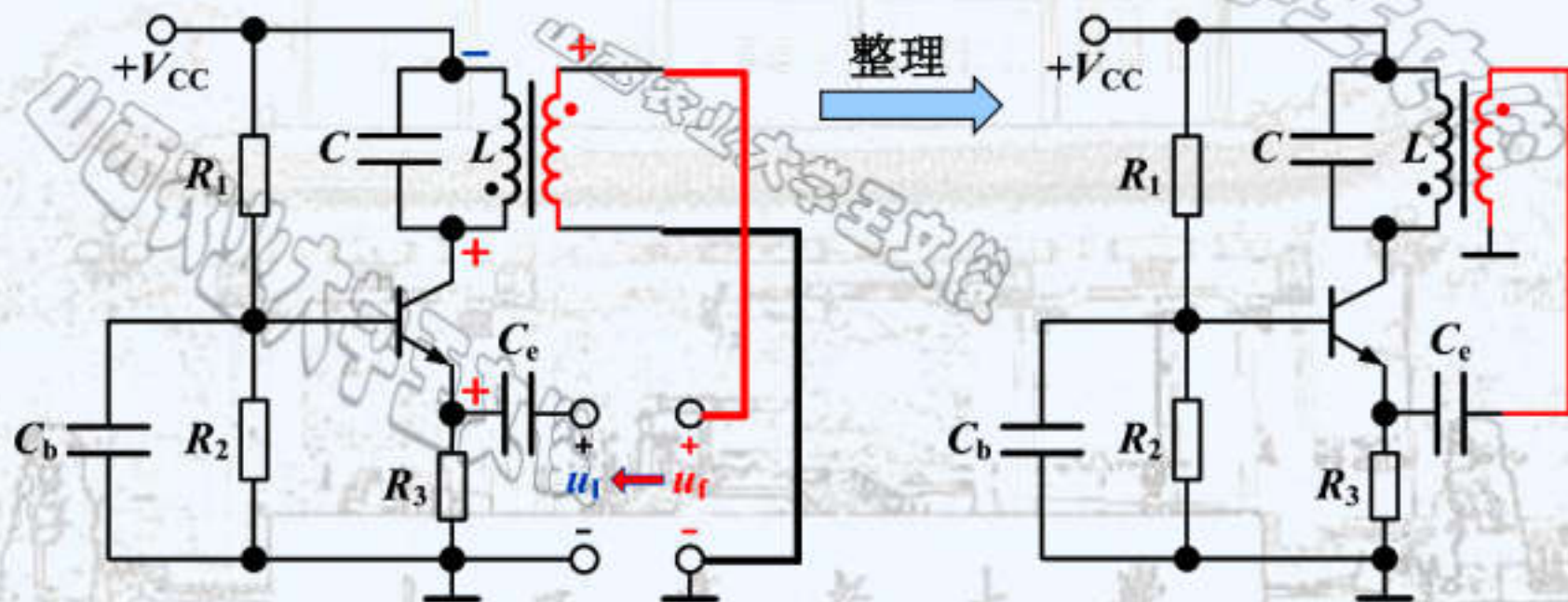
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\beta \dot{I}_b Z}{\dot{I}_b r_{be}} = \beta \frac{Z}{r_{be}}$$

- 当  $f = f_0$  时, 电压放大倍数的数值最大, 且无附加相移。
- 对于其他频率的信号, 电压放大倍数的数值减小, 且有附加相移。
- 电路同时具有放大功能和选频特性, 因此被称为选频放大电路。

# 十一、共基放大电路的正弦波振荡电路

## • 1、变压器反馈式振荡电路

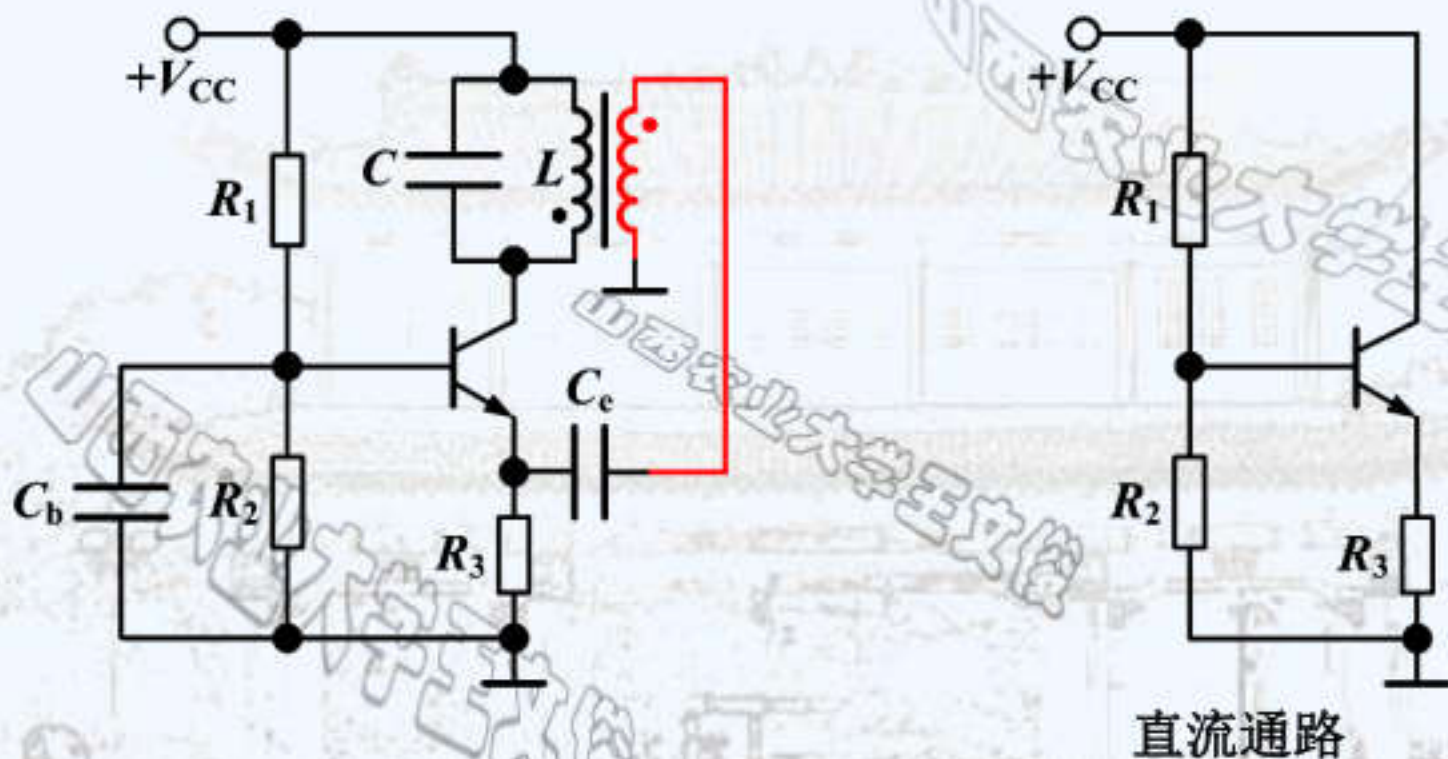
在选频放大电路中通过变压器反馈的方式引入正反馈，从而构成变压器反馈式振荡电路。





## 1、变压器反馈式振荡电路

① 工作状态（静态） 静态工作点是否合理

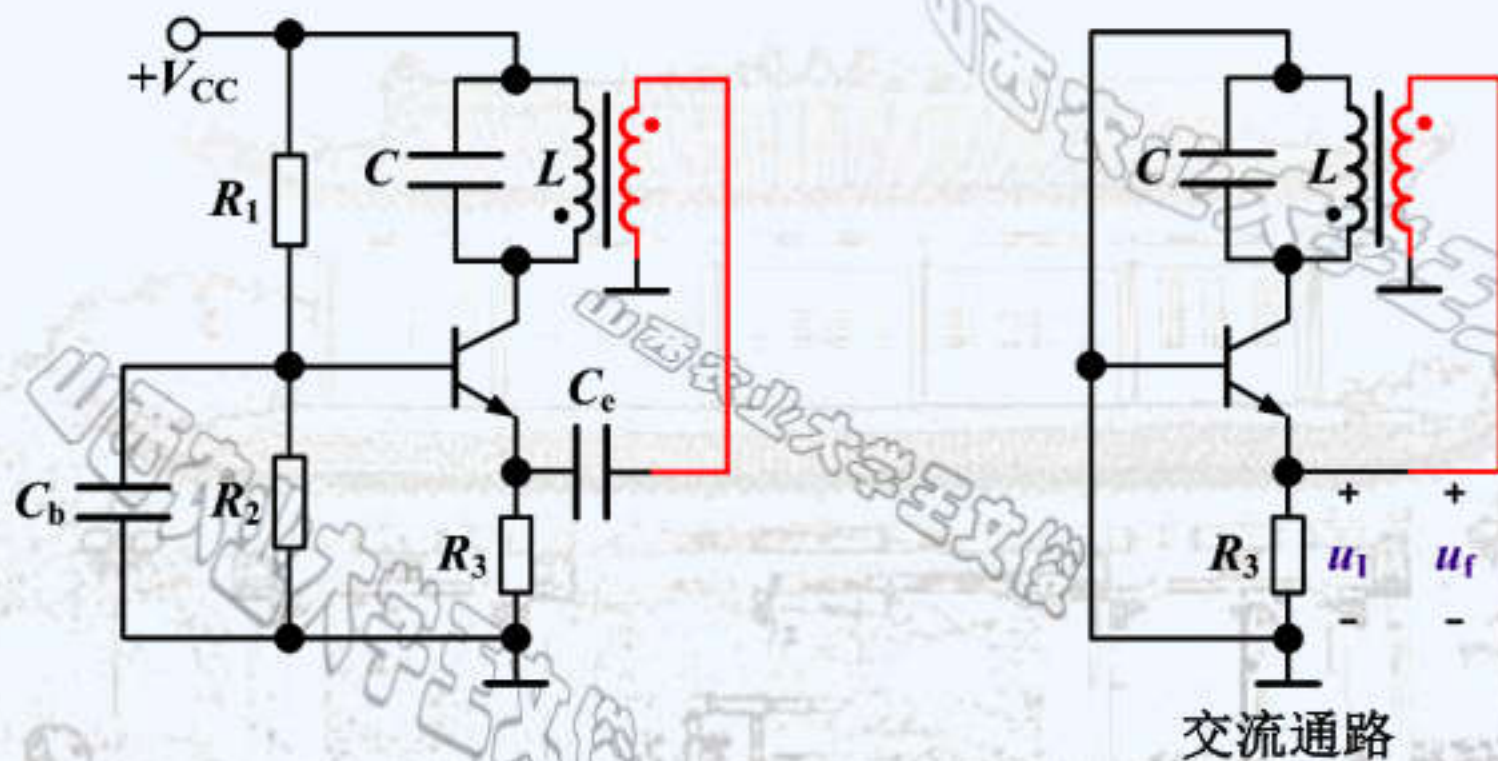


根据直流通路，放大电路为典型的静态工作点稳定电路，可以设置合适的静态工作点。



# 1、变压器反馈式振荡电路

② 工作状态（动态） 交流信号能否正常传输

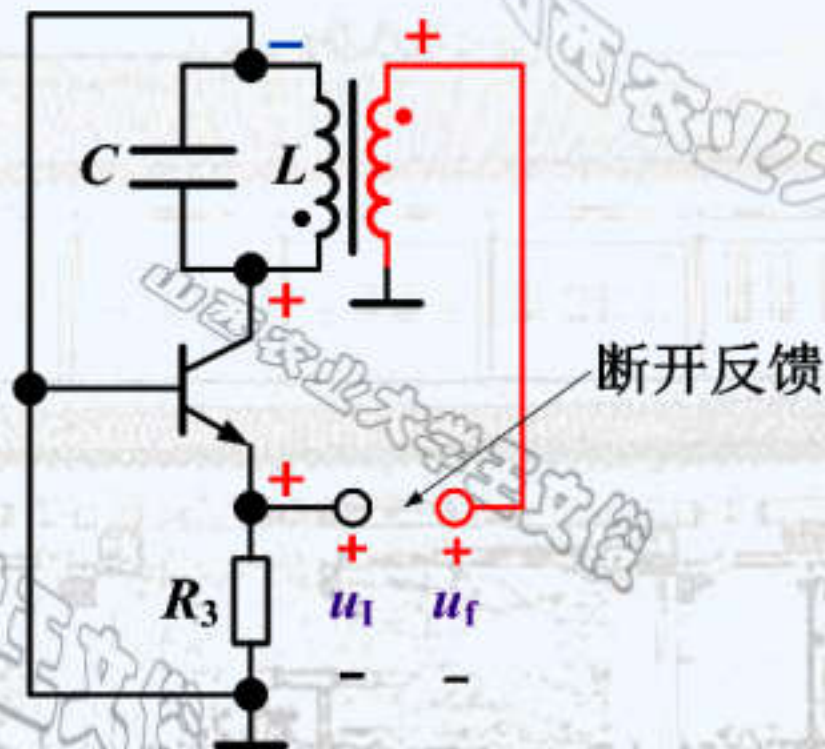


根据交流通路，交流信号传递过程中无开路或短路现象，电路可以正常放大。

## • 1、变压器反馈式振荡电路

### ③ 相位条件

是否满足相位条件，即反馈是否为正反馈



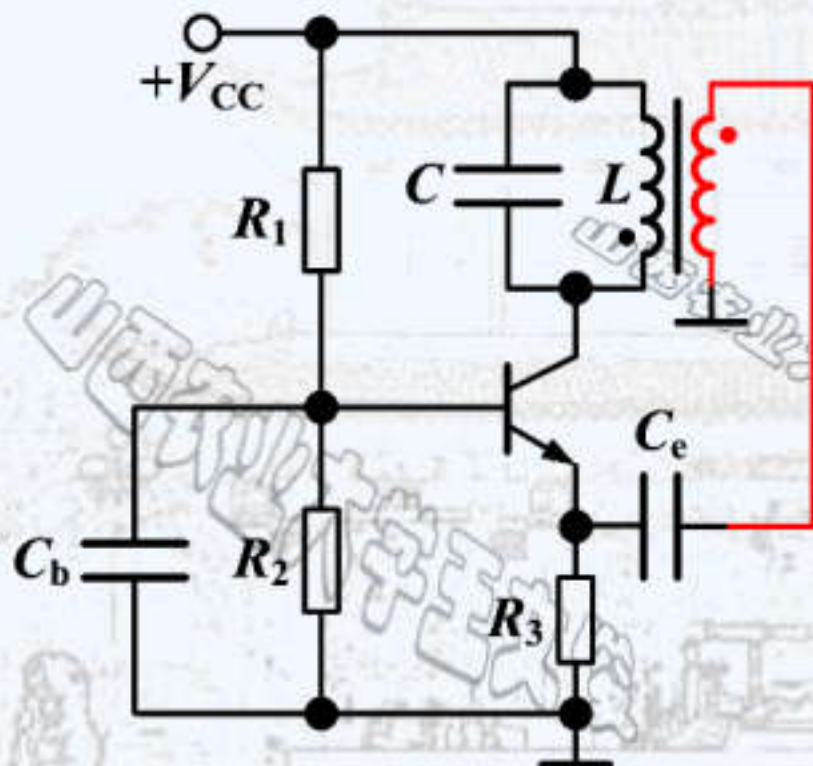
电路中引入了正反馈，故满足相位条件，有可能产生正弦波振荡。



# 1、变压器反馈式振荡电路

## ④ 振荡频率

根据  $LC$  谐振回路确定振荡频率



•  $LC$  回路总电容:

$$C = C$$

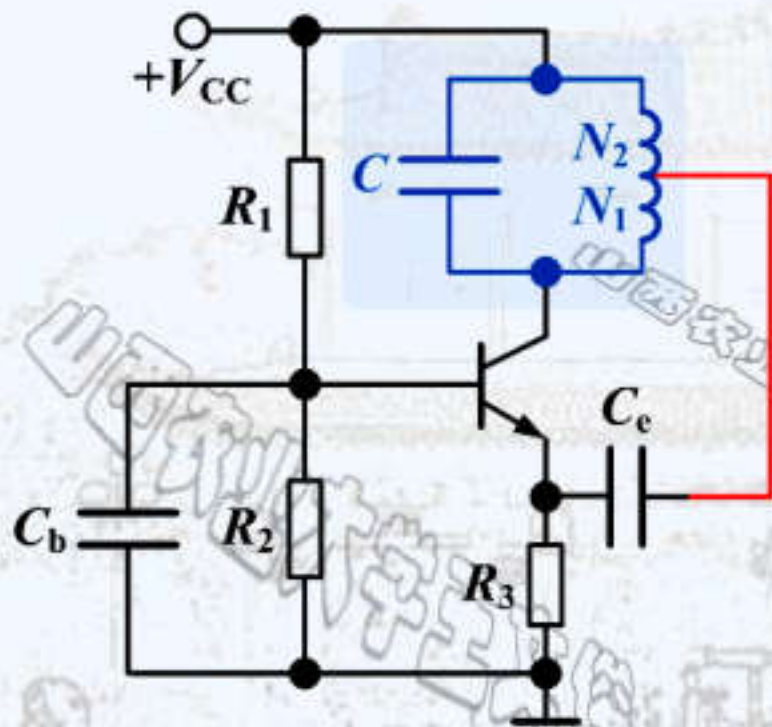
•  $LC$  回路总电感 (将二次侧折合到一次侧后的总电感):  $L'$

• 电路的振荡频率:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}}$$

## • 2、电感反馈式振荡电路

电感反馈式振荡电路是在变压器反馈式振荡电路的基础上改进而来的。



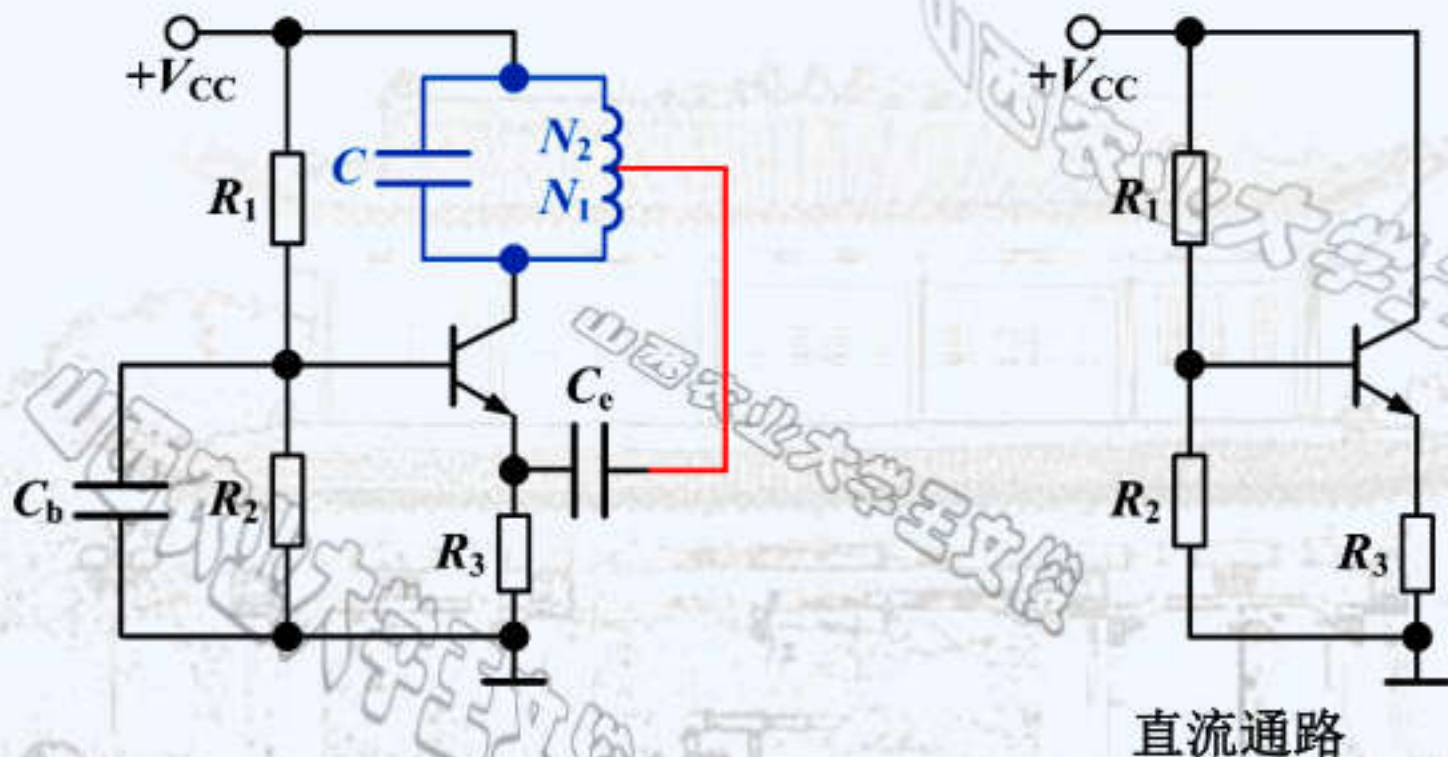
电感反馈式振荡电路

- 克服变压器反馈式振荡电路中变压器一次线圈和二次线圈耦合不紧密的缺点。
- 将  $N_1$  和  $N_2$  合并为一个线圈，接在集电极和电源之间。
- 从  $N_1$  和  $N_2$  的中间抽头处引出正反馈信号。
- 增强谐振效果
- 将电容  $C$  跨接在整个线圈两端。



## • 2、电感反馈式振荡电路

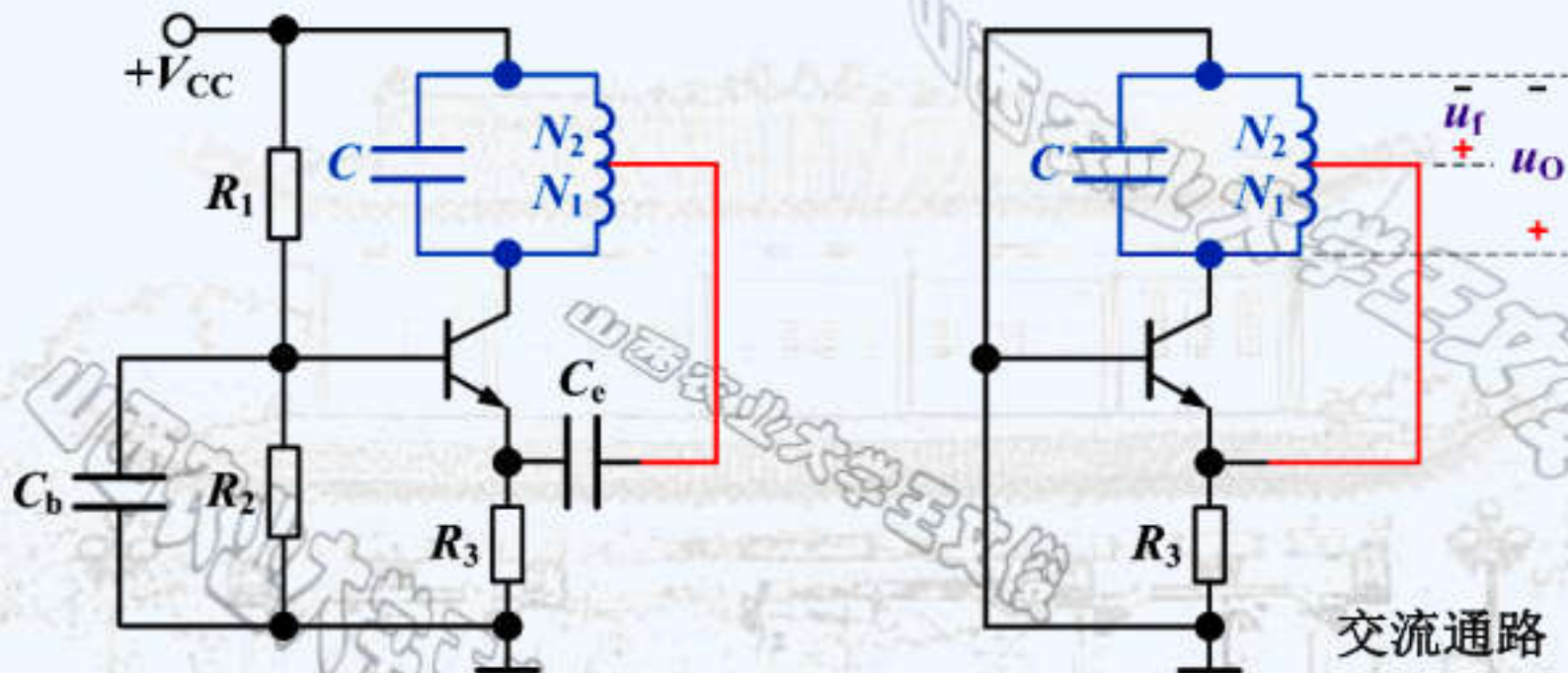
① 工作状态（静态） 静态工作点是否合理



根据直流通路，放大电路为典型的静态工作点稳定电路，可以设置合适的静态工作点。

## • 2、电感反馈式振荡电路

② 工作状态（动态） 交流信号能否正常传输



- 由于一次线圈的三个端分别接在晶体管的三个极，故称电感反馈式振荡电路为电感三点式电路。

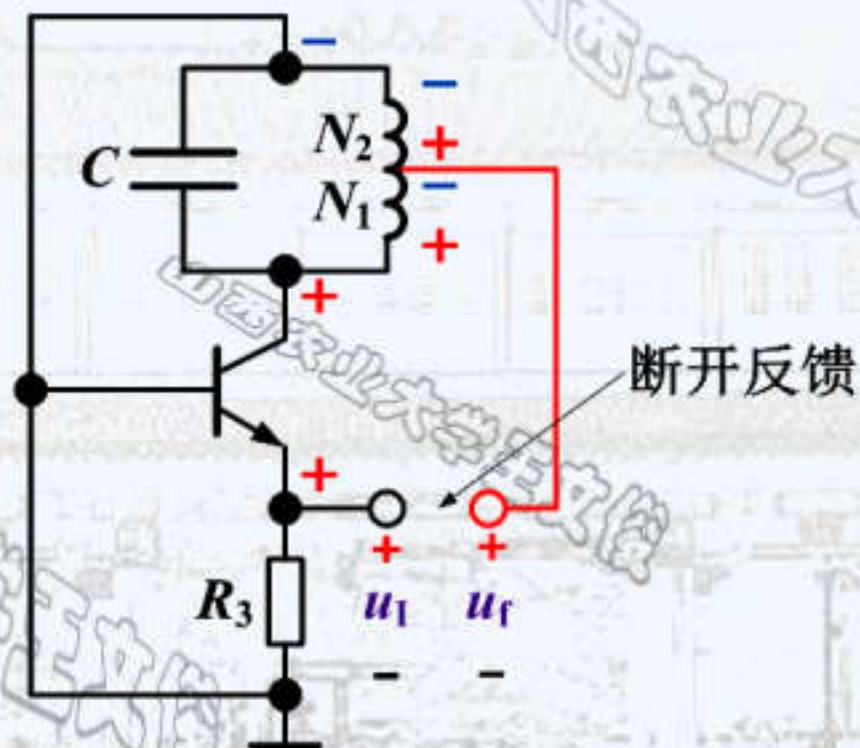
交流信号传递过程中无开路或短路现象，电路可以正常放大。



## • 2、电感反馈式振荡电路

### ③ 相位条件

是否满足相位条件，即反馈是否为正反馈

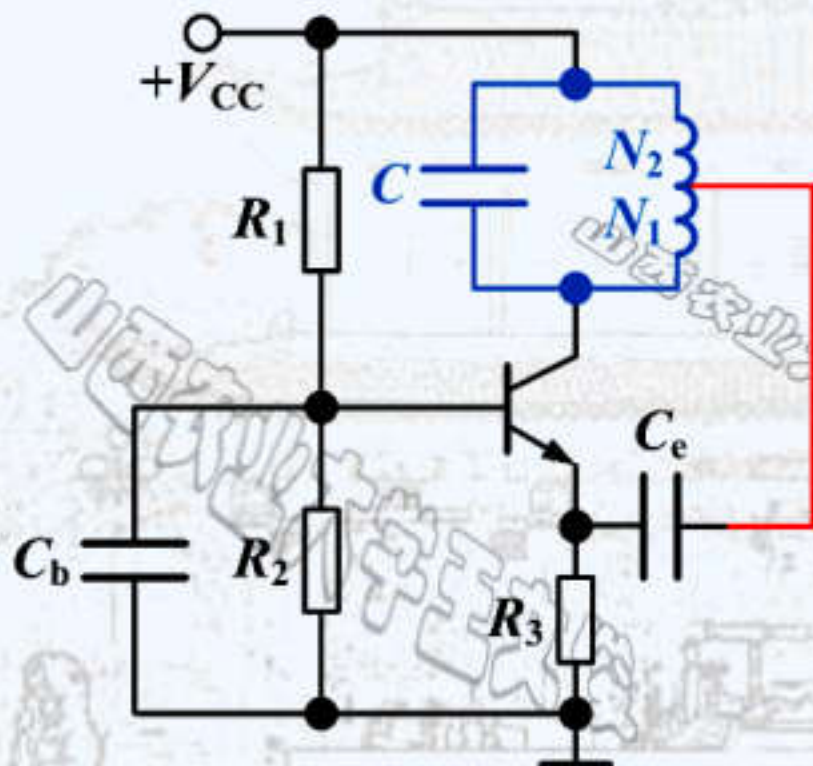


电路中引入了正反馈，故满足相位条件，有可能产生正弦波振荡。

## • 2、电感反馈式振荡电路

### ④ 振荡频率

根据  $LC$  谐振回路确定振荡频率



- $L_1 - N_1$  的电感
- $L_2 - N_2$  的电感
- $M - N_1$  和  $N_2$  间的互感

- $LC$  回路总电容:

$$C = C$$

- $LC$  回路总电感:

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$

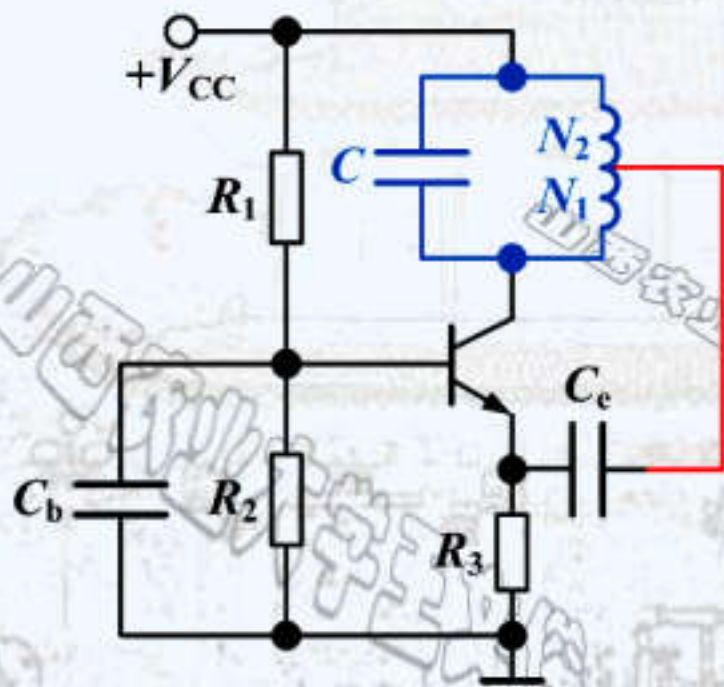
- 电路的振荡频率:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}}$$

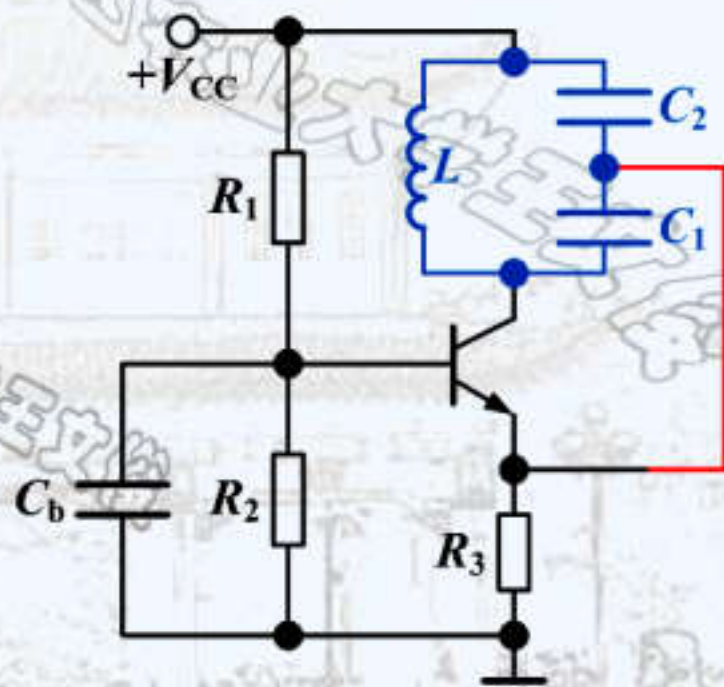


### • 3、电容反馈式振荡电路

将电感反馈式振荡电路中的电容换成电感，电感换成电容，就构成了电容反馈式振荡电路。



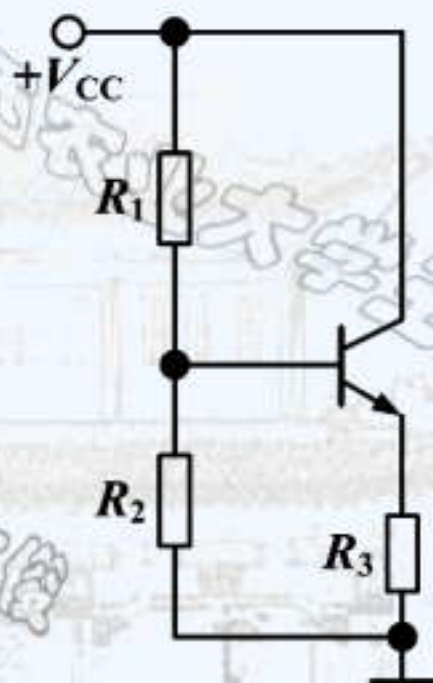
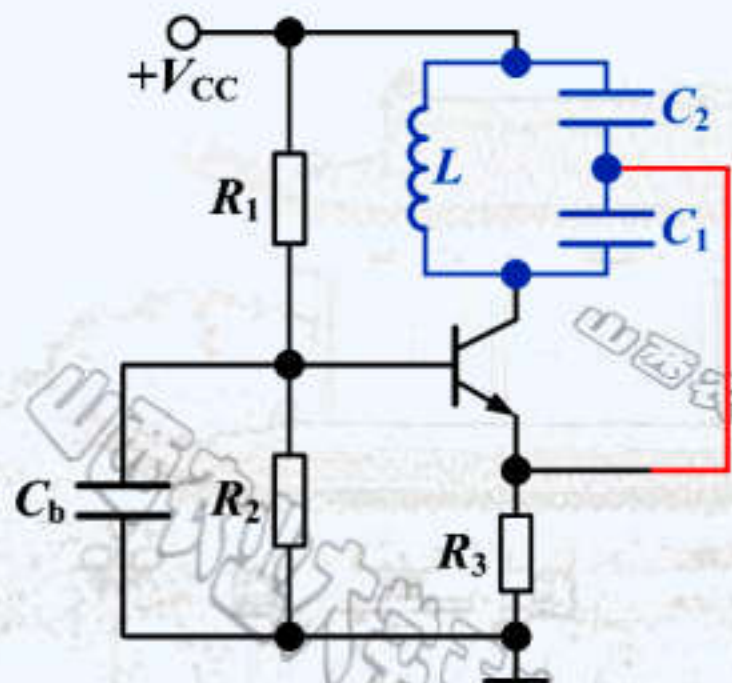
电感反馈式振荡电路



电容反馈式振荡电路

### • 3、电容反馈式振荡电路

① 工作状态（静态） 静态工作点是否合理



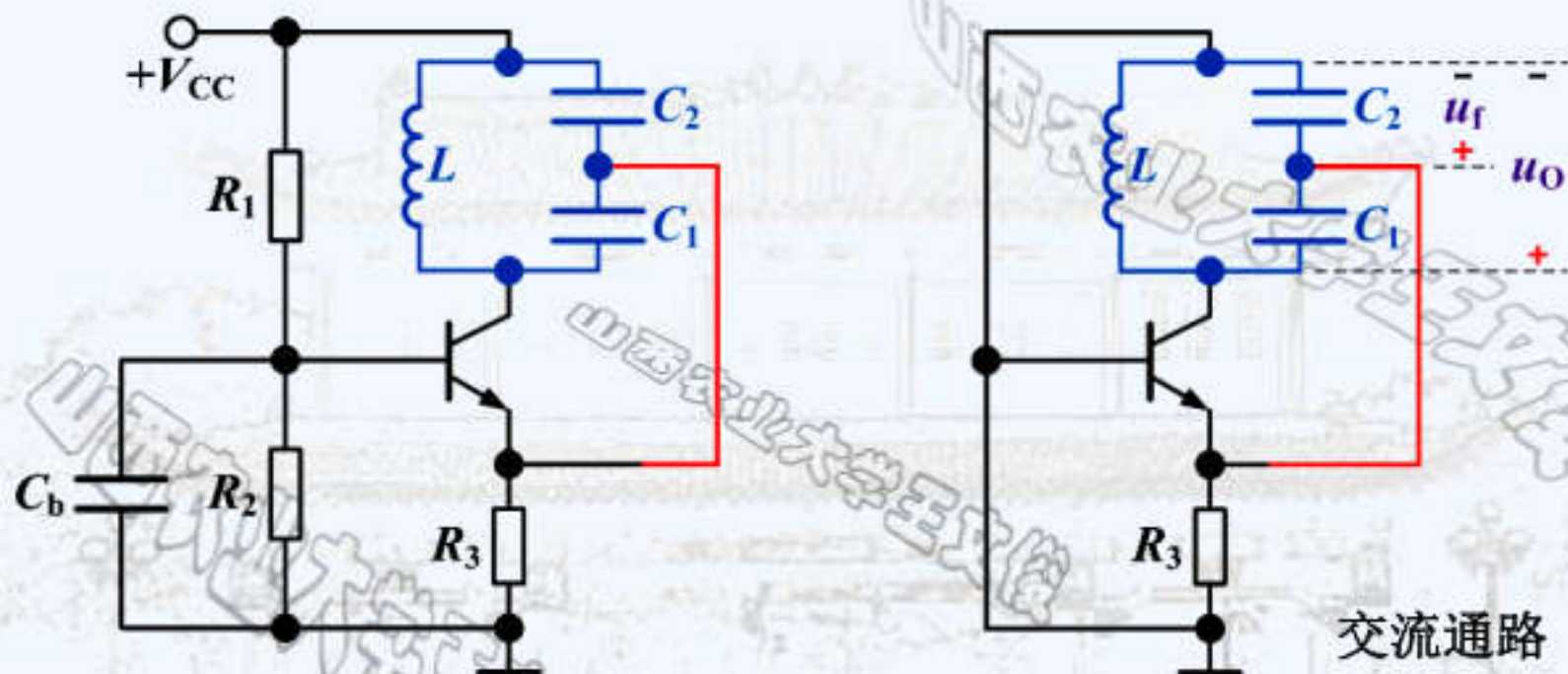
直流通路

根据直流通路，放大电路为典型的静态工作点稳定电路，可以设置合适的静态工作点。



### • 3、电容反馈式振荡电路

② 工作状态（动态） 交流信号能否正常传输



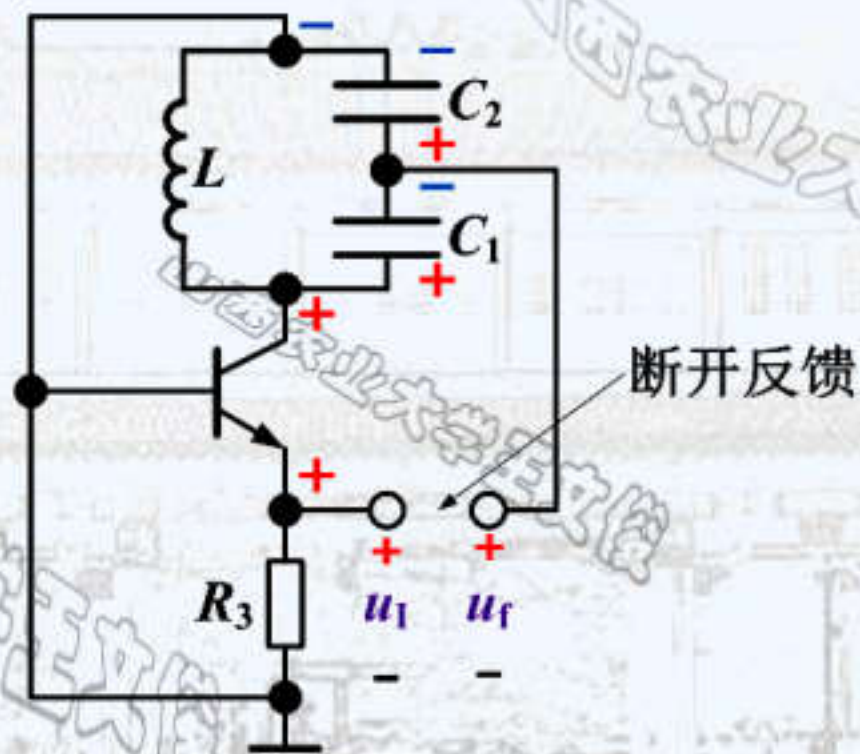
- 由于两个电容的三个端分别接在晶体管的三个极，故称电容反馈式振荡电路为电容三点式电路。

交流信号传递过程中无开路或短路现象，电路可以正常放大。

### • 3、电容反馈式振荡电路

#### ③ 相位条件

是否满足相位条件，即反馈是否为正反馈



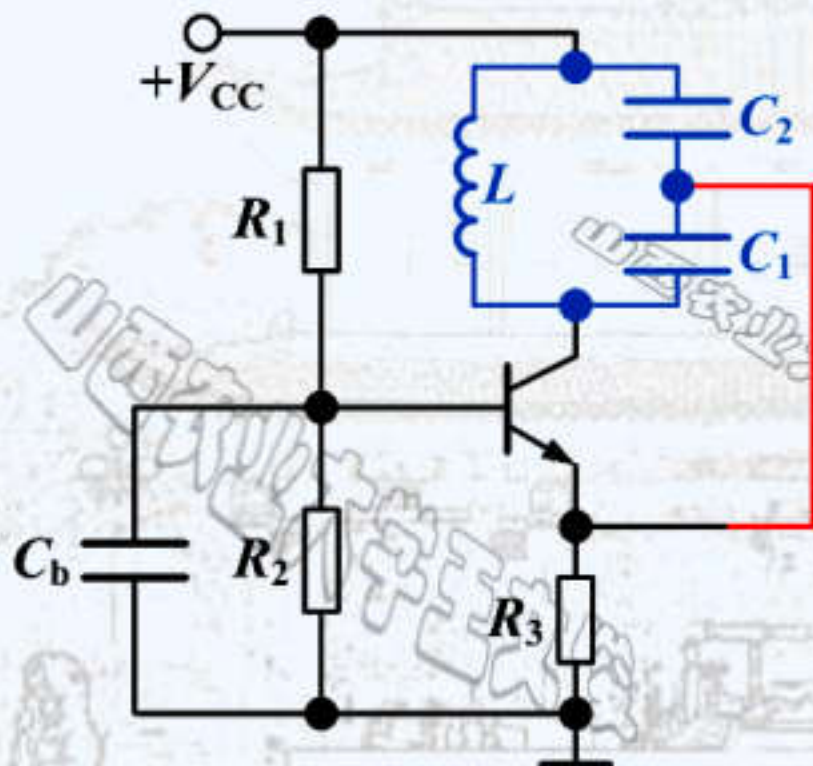
电路中引入了正反馈，故满足相位条件，有可能产生正弦波振荡。



### • 3、电容反馈式振荡电路

#### ④ 振荡频率

根据  $LC$  谐振回路确定振荡频率



•  $LC$  回路总电容:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

•  $LC$  回路总电感:

$$L = L$$

• 电路的振荡频率:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

## 十二、正弦波振荡电路的判断

### • 1、放大电路能否正常工作的判断

若正弦波振荡电路中的放大电路不能正常工作，就不可能产生振荡。

工作状态分析

静态分析  
(直流通路)

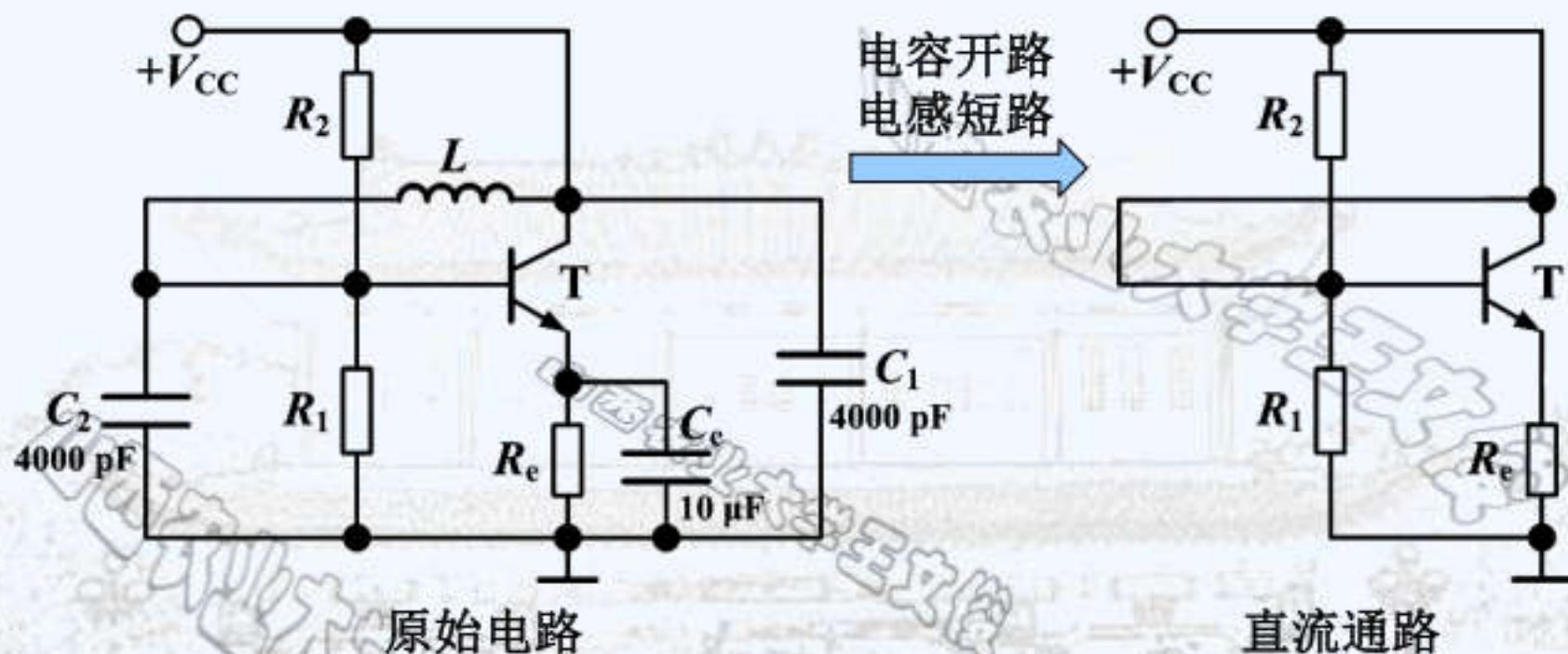
动态分析  
(交流通路)

放大电路能够  
建立合适的静态工作点

动态信号能够  
正常的传递



# 1、放大电路能否正常工作的判断



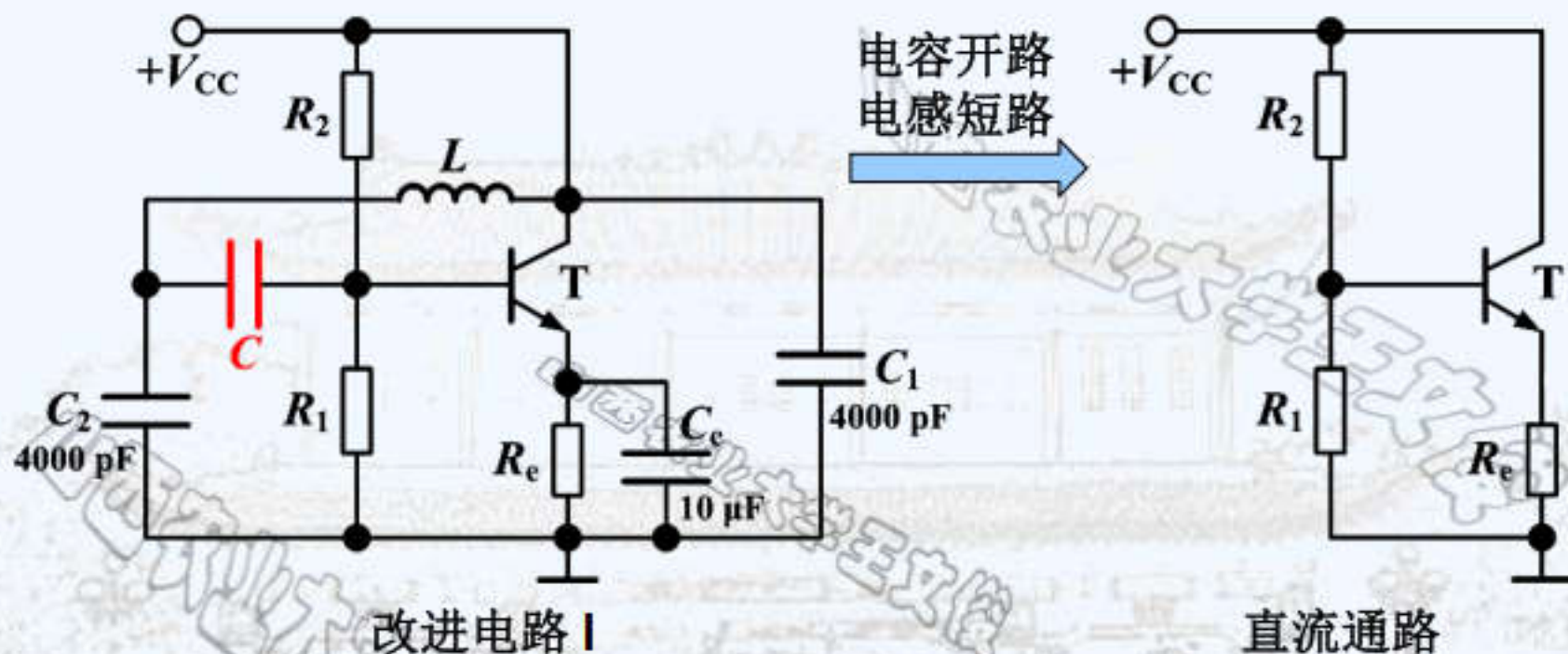
## 存在问题

基极电位为  $+V_{CC}$ ，无法设置合适的静态工作点。

## 解决方法

在输入端加耦合电容  $C$ ，使电路能够设置合适的静态工作点。

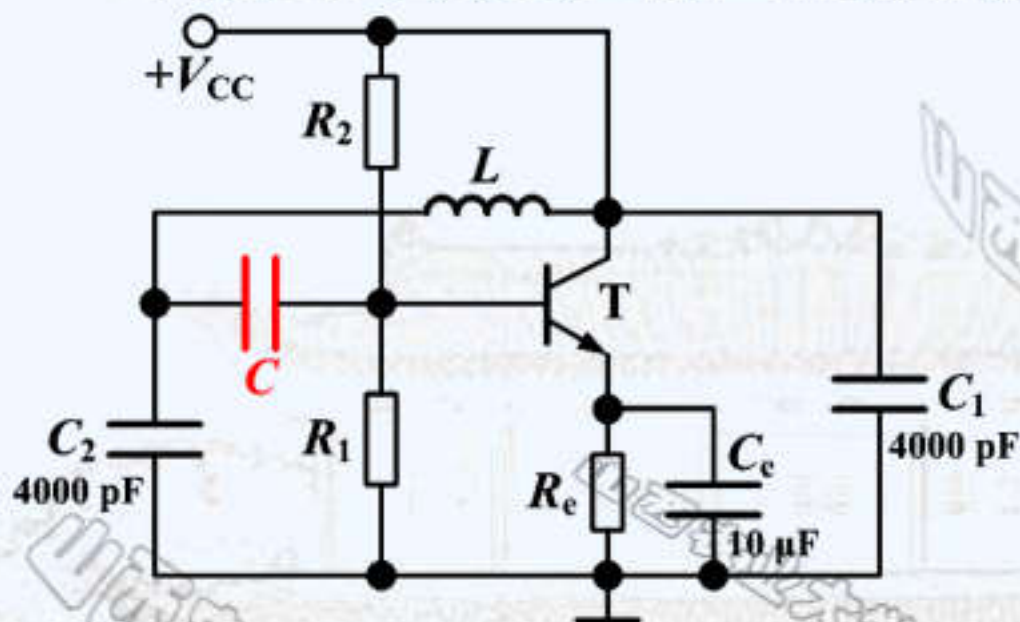
# 1、放大电路能否正常工作的判断



根据直流通路，放大电路为典型的静态工作点稳定电路，可以设置合适的静态工作点。



# 1、放大电路能否正常工作的判断

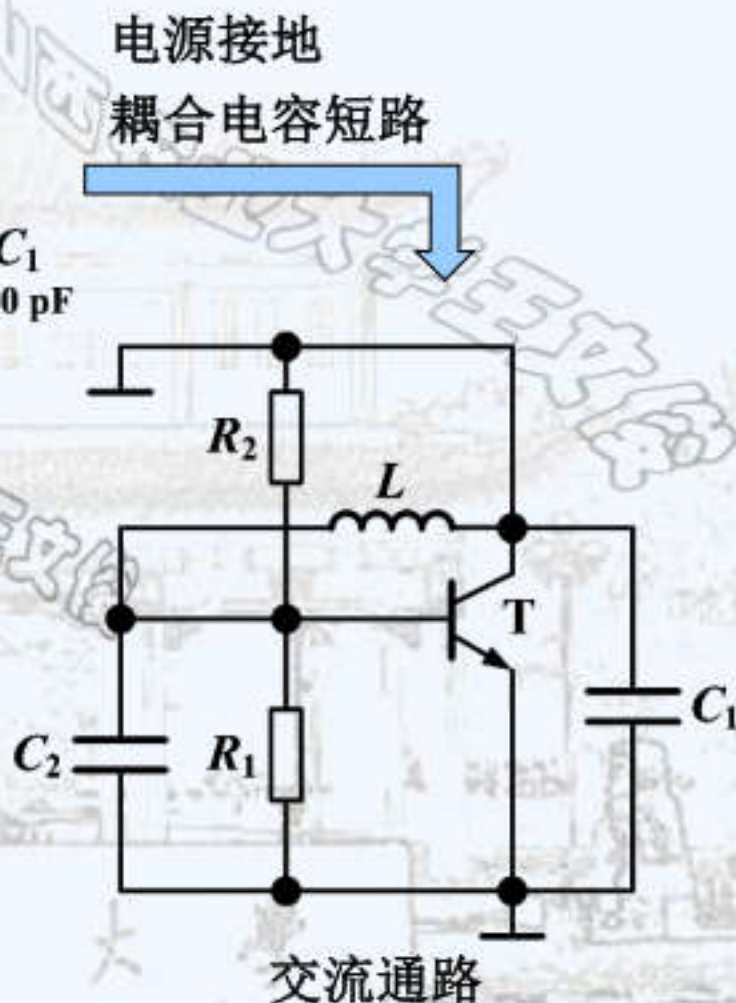


存在问题

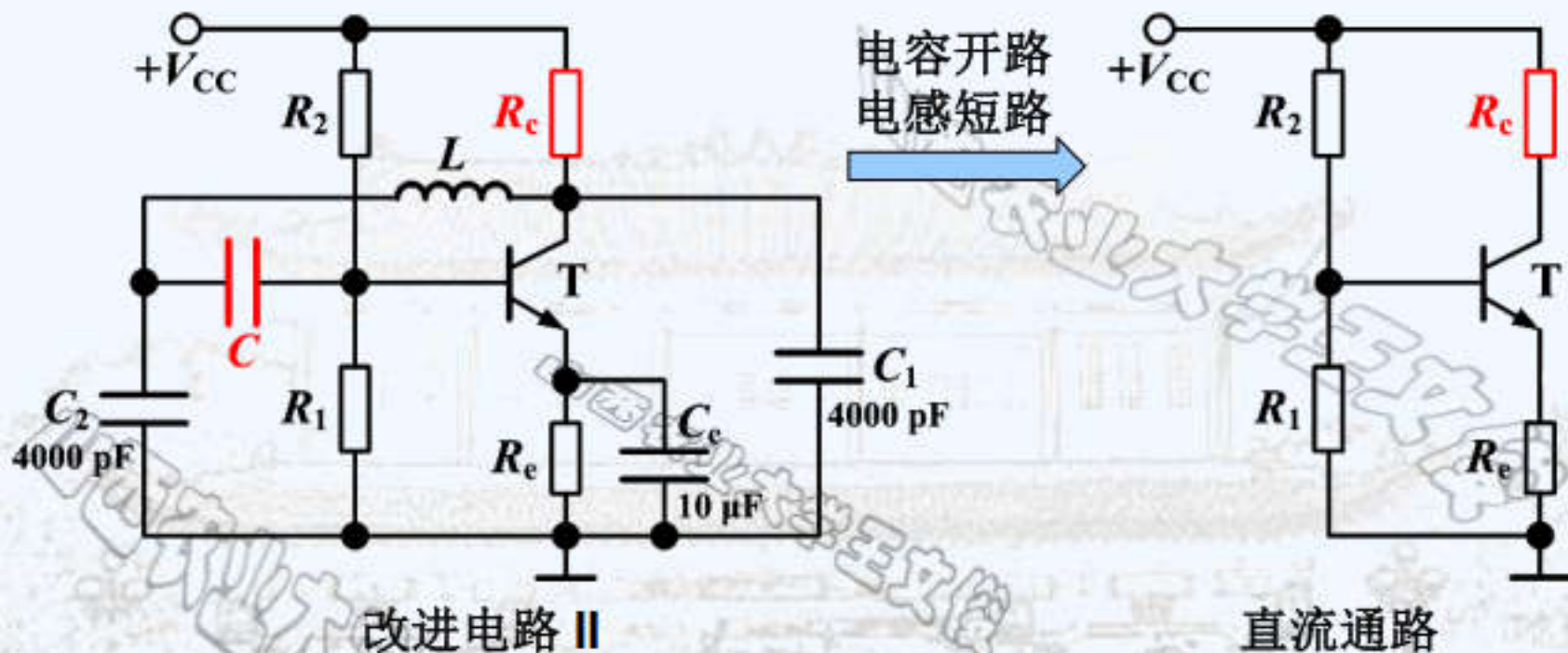
集电极和发射极同时接地，输出电压恒为零。

解决方法

在集电极增加电阻  $R_c$



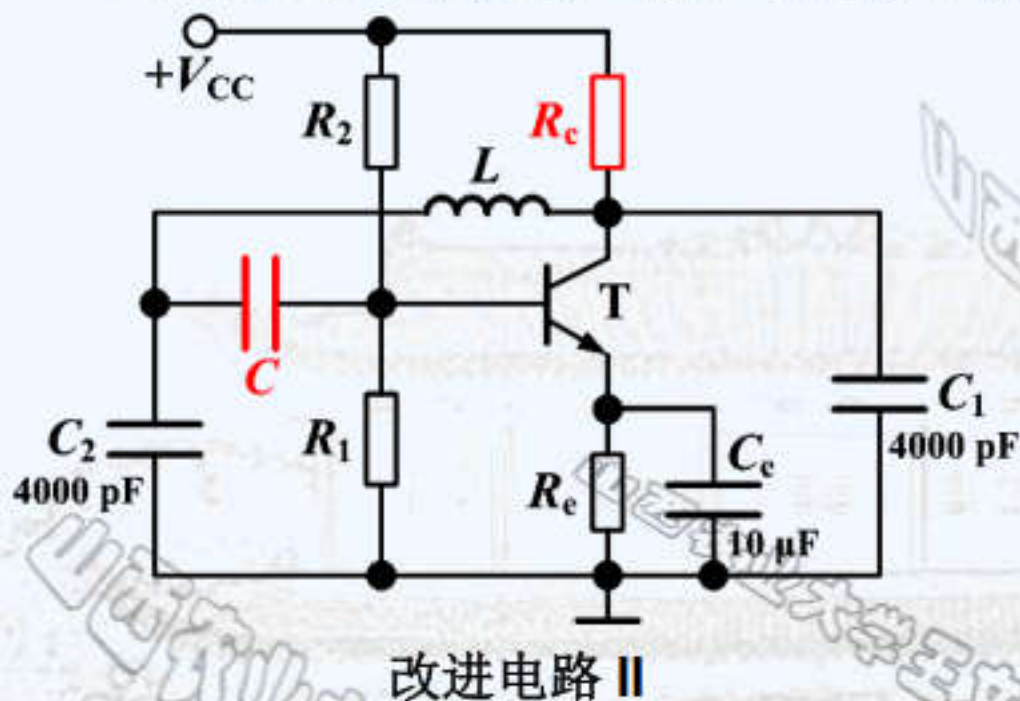
# 1、放大电路能否正常工作的判断



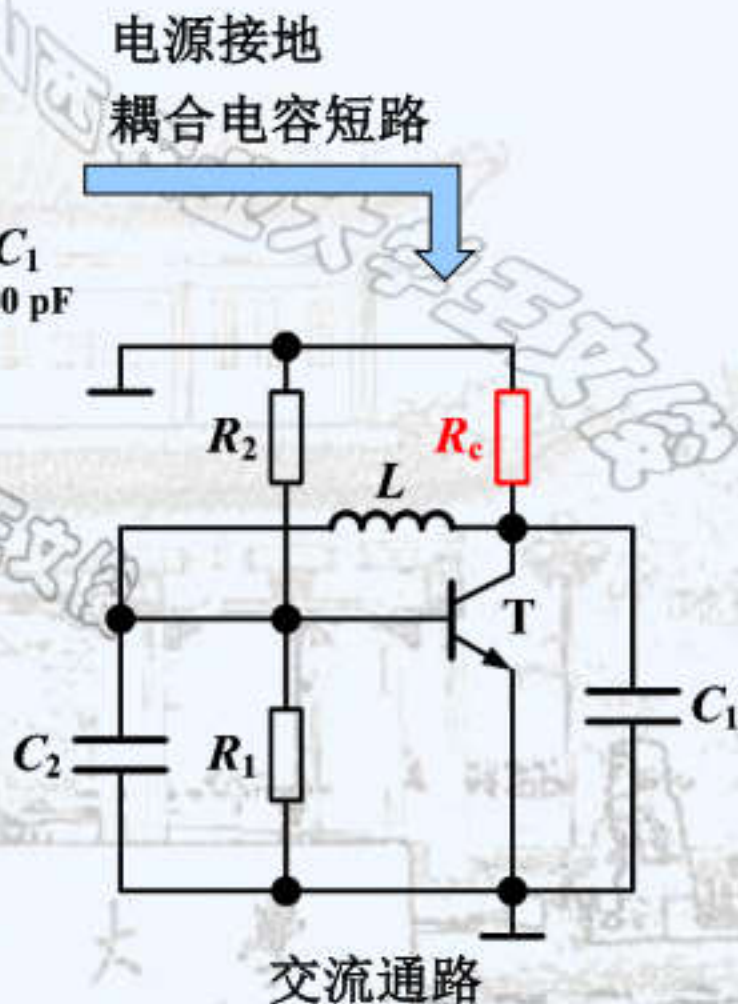
根据直流通路，放大电路为典型的静态工作点稳定电路，可以设置合适的静态工作点。



# 1、放大电路能否正常工作的判断



交流信号传递过程中无开路或短路现象，电路可以正常放大。

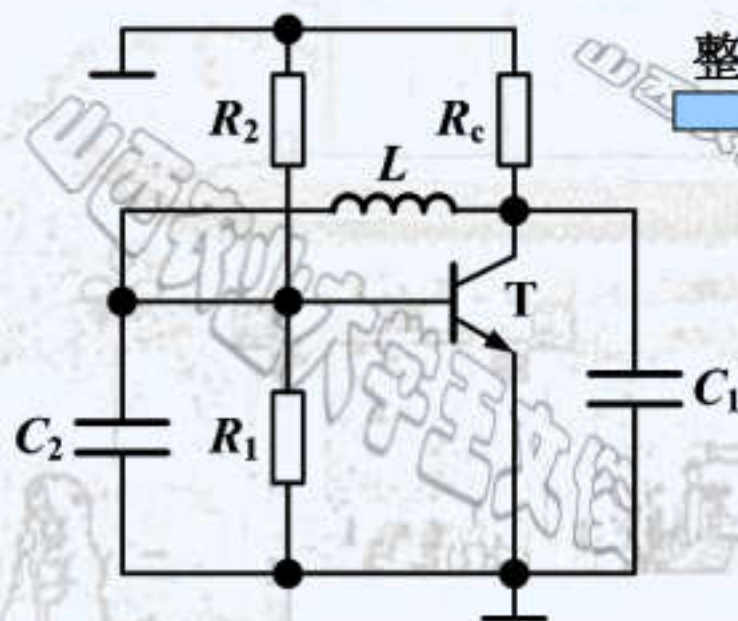


## • 2、反馈电压的来源判断

采用瞬时极性法判断反馈的极性时，必须首先确定反馈电压的来源。

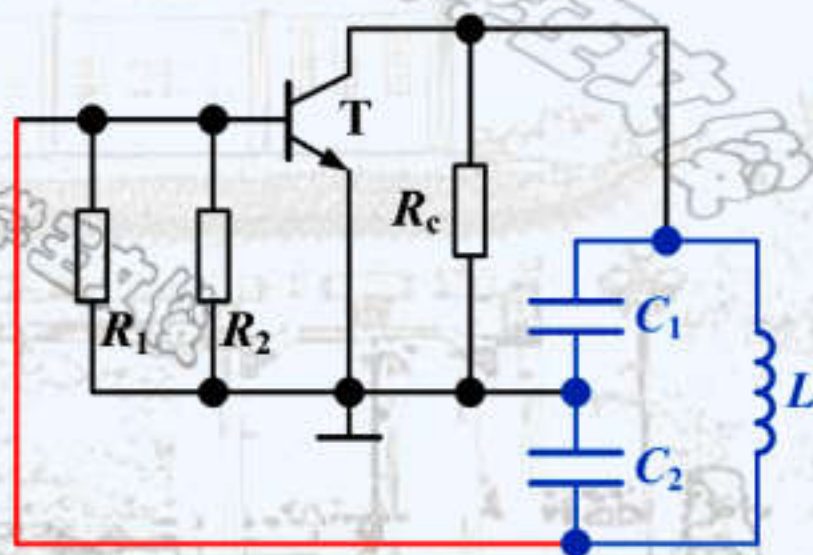
在正弦波振荡电路中，反馈电压总是取自某个元件。

对于大多数电路，在交流通路中这个元件有一端接“地”，因而这一特点成为寻找反馈电压的依据。



交流通路

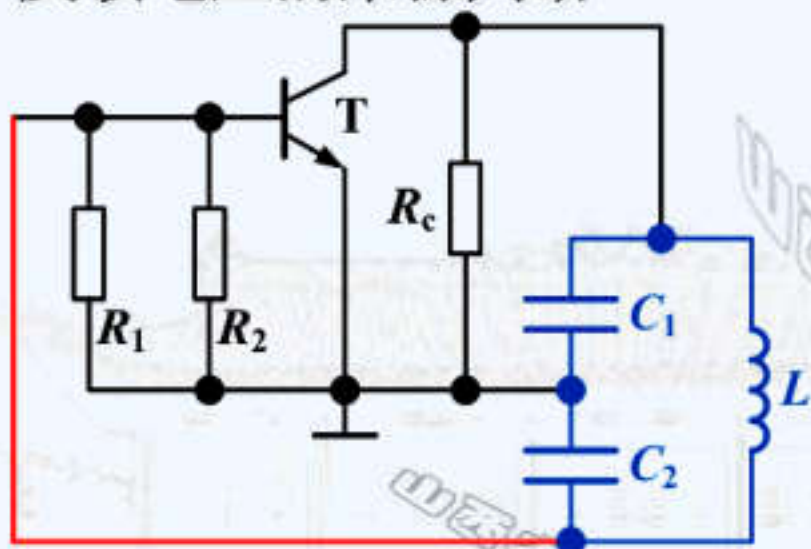
整理



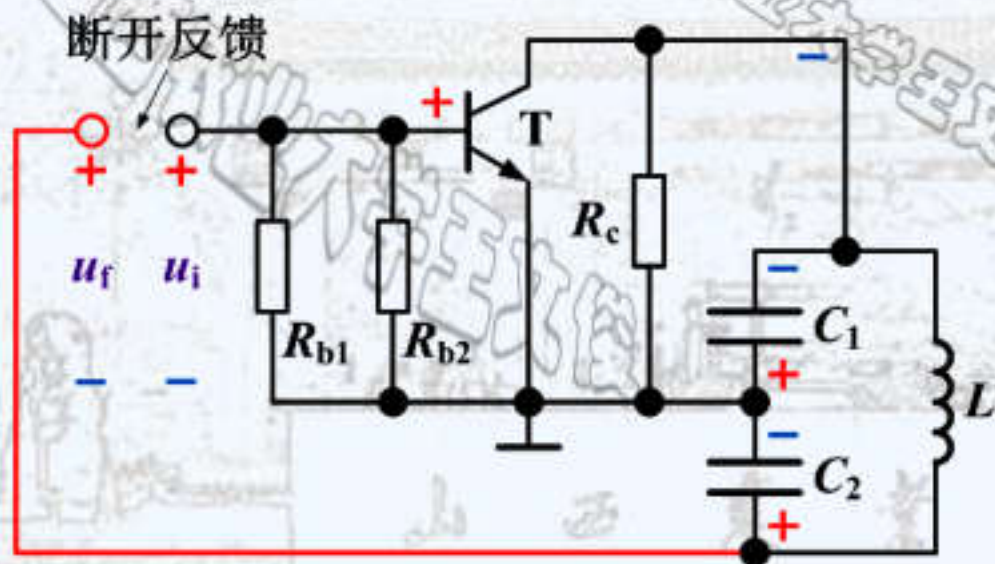
整理后的交流通路



## 2、反馈电压的来源判断

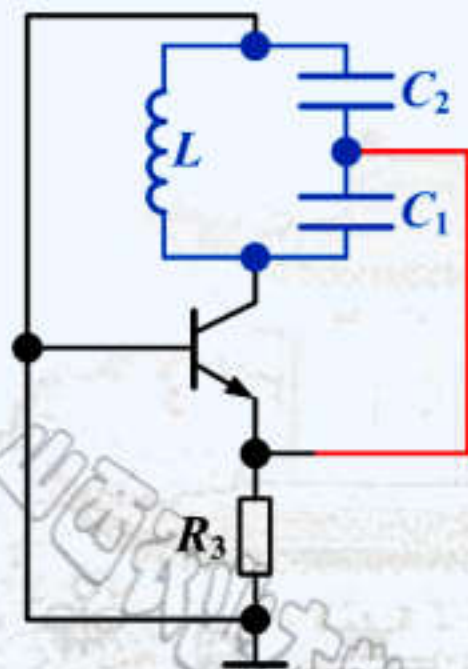


- 输出电压 —  $C_1$  两端电压
- 反馈电压 —  $C_2$  两端电压
- 电路类型 — 电容反馈式

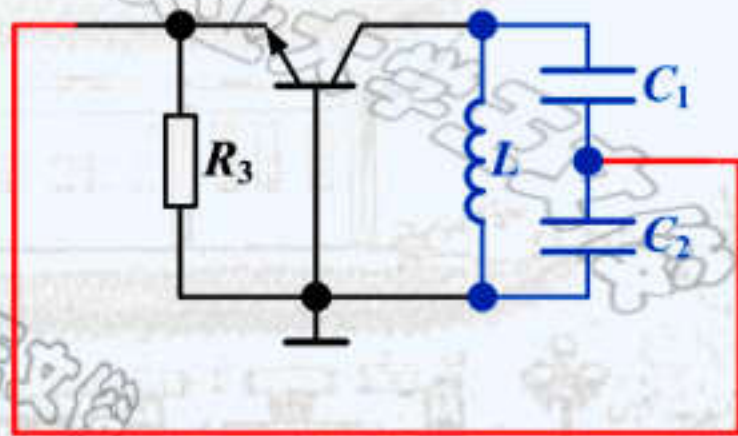


电路中引入了正反馈，故满足相位条件，有可能产生正弦波振荡。

## • 2、反馈电压的来源判断



整理

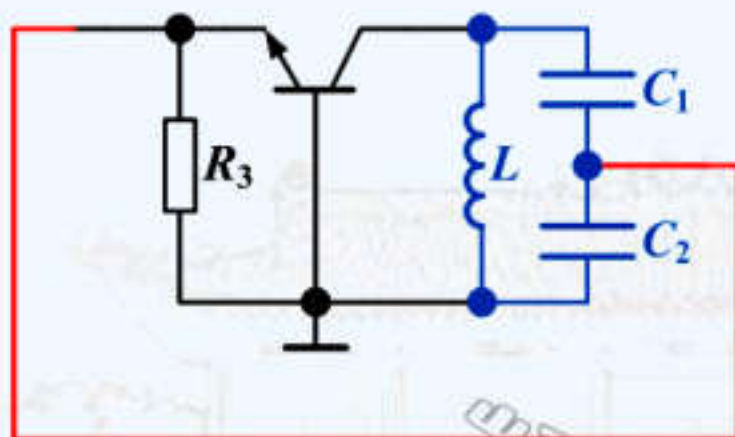


采用共基放大电路的  
电容反馈式振荡电路  
的交流通路

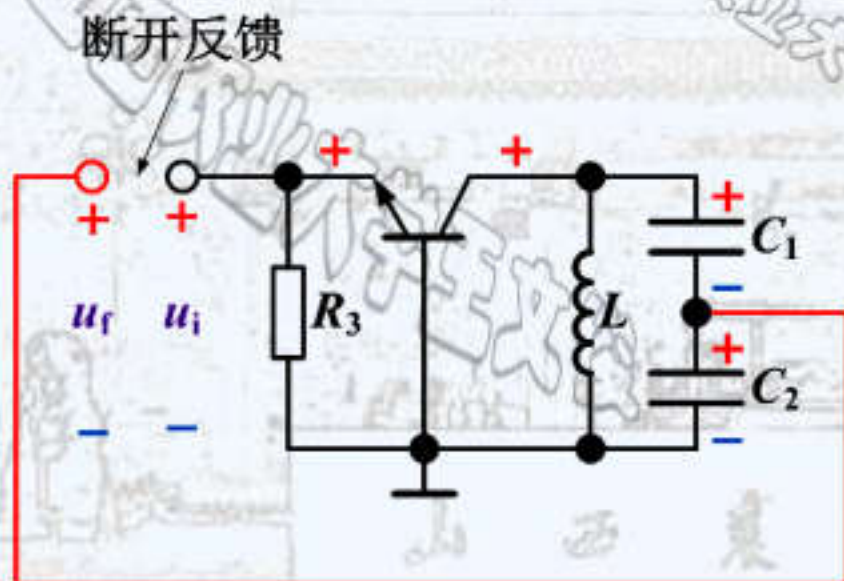
整理后的交流通路



## • 2、反馈电压的来源判断



- 输出电压 —  $C_1$  和  $C_2$  两端电压
- 反馈电压 —  $C_2$  两端电压
- 电路类型 — 电容反馈式



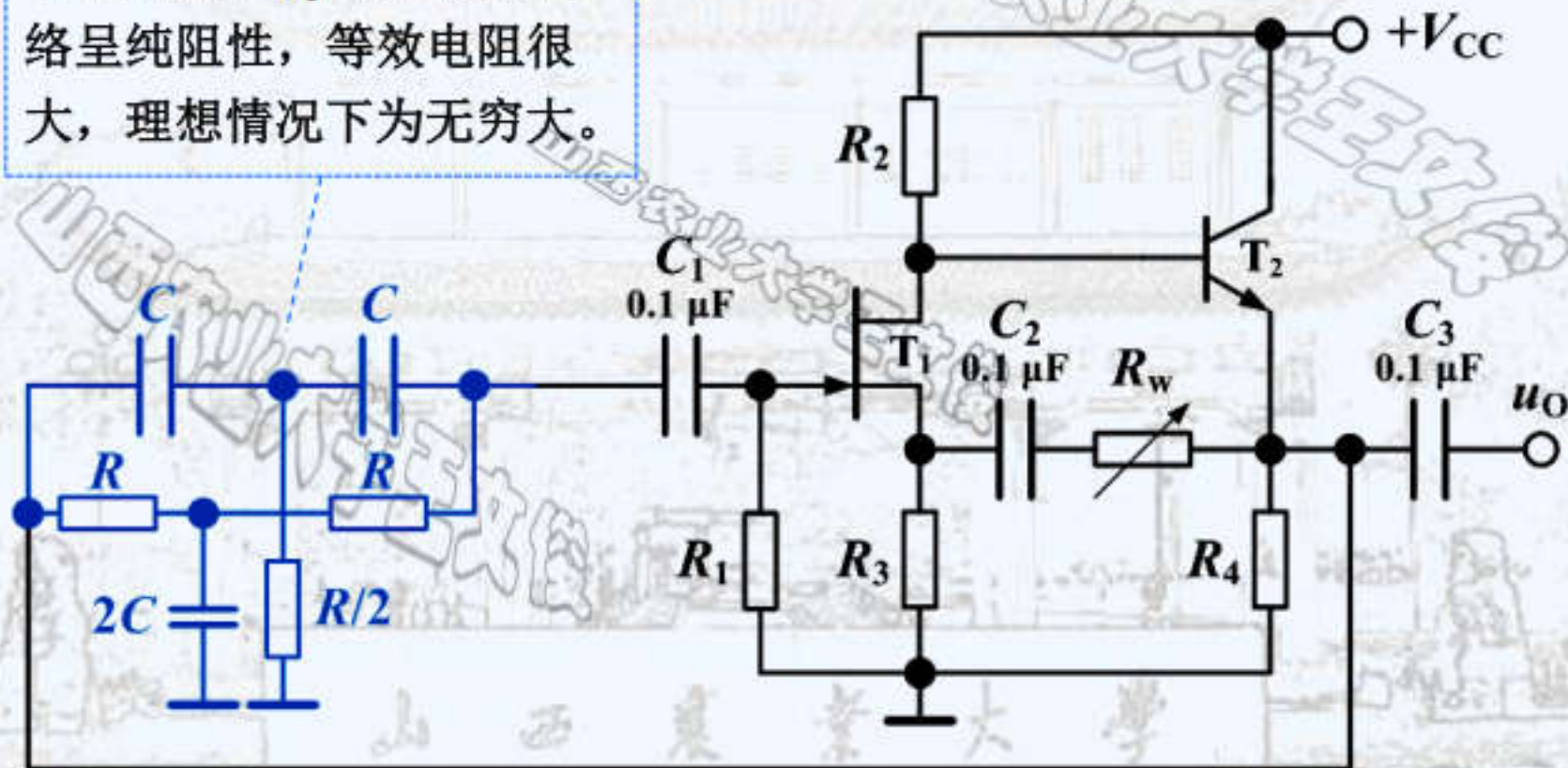
电路中引入了正反馈，故满足相位条件，有可能产生正弦波振荡。

### • 3、选频网络和正反馈网络不是同一网络

在一些电路中，选频网络与正反馈网络并不是同一网络。

#### 双 T 选频网络

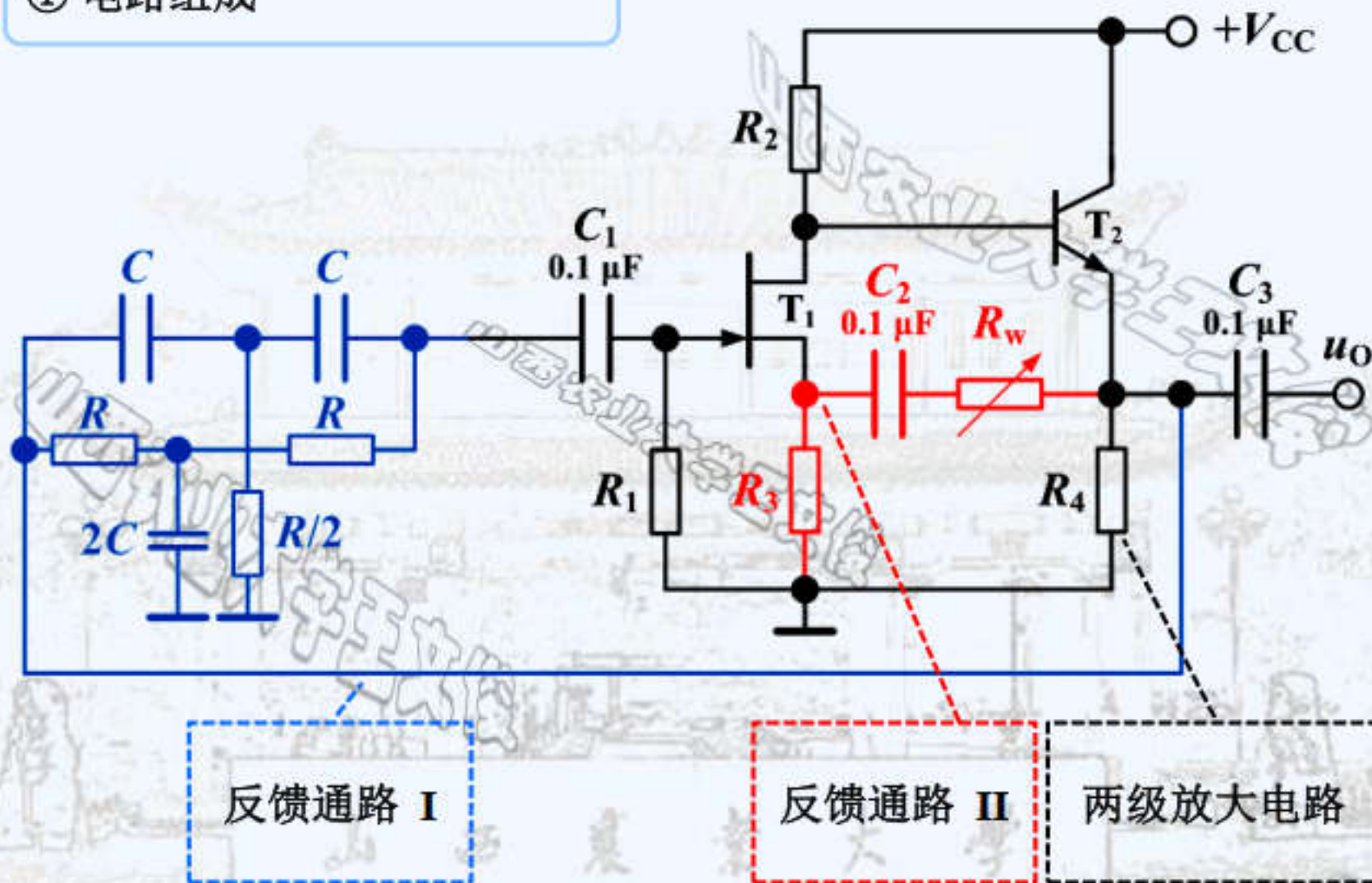
在谐振频率  $f_0$  下，选频网络呈纯阻性，等效电阻很大，理想情况下为无穷大。





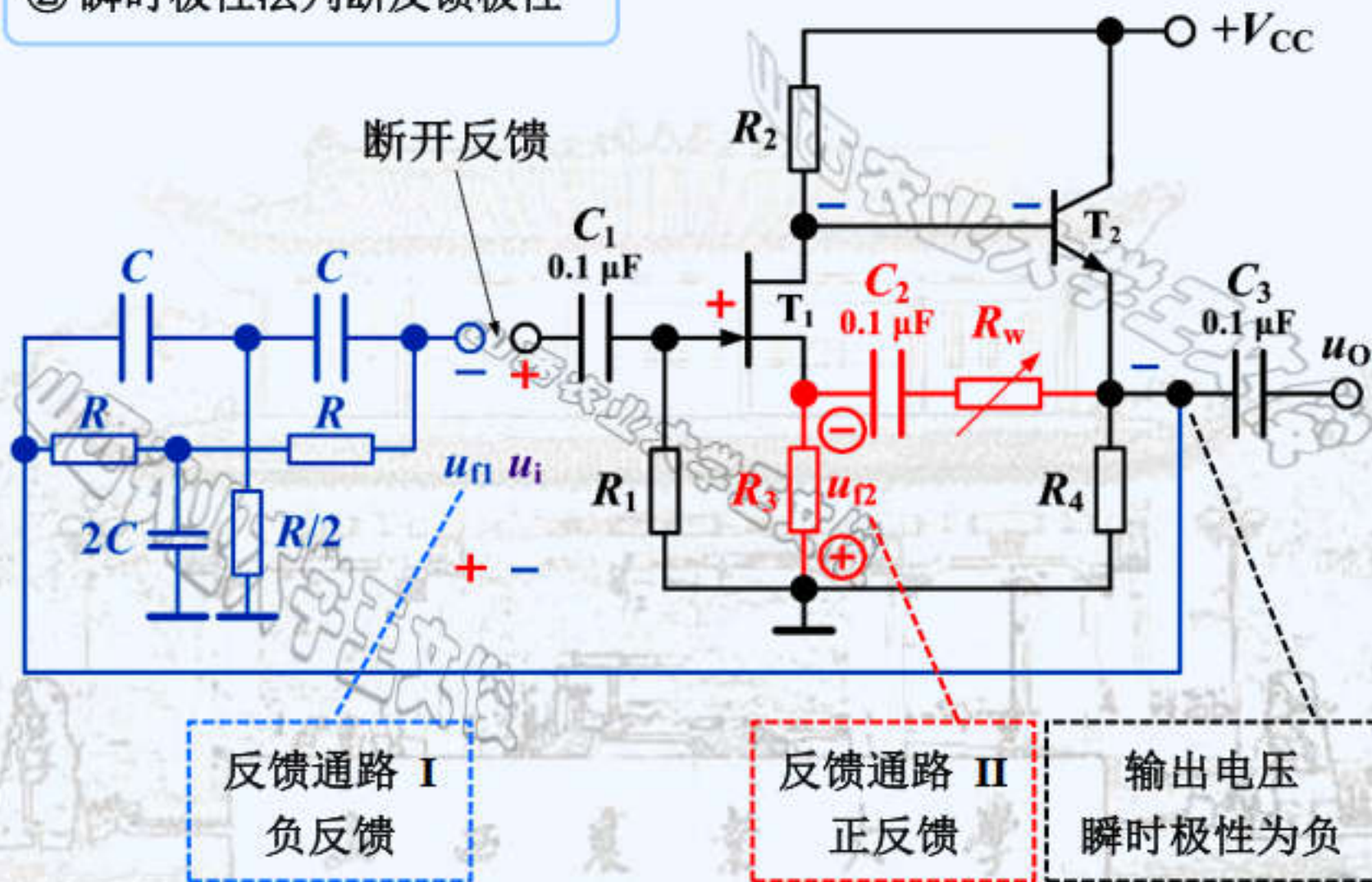
### 3、选频网络和正反馈网络不是同一网络

#### ① 电路组成



### 3、选频网络和正反馈网络不是同一网络

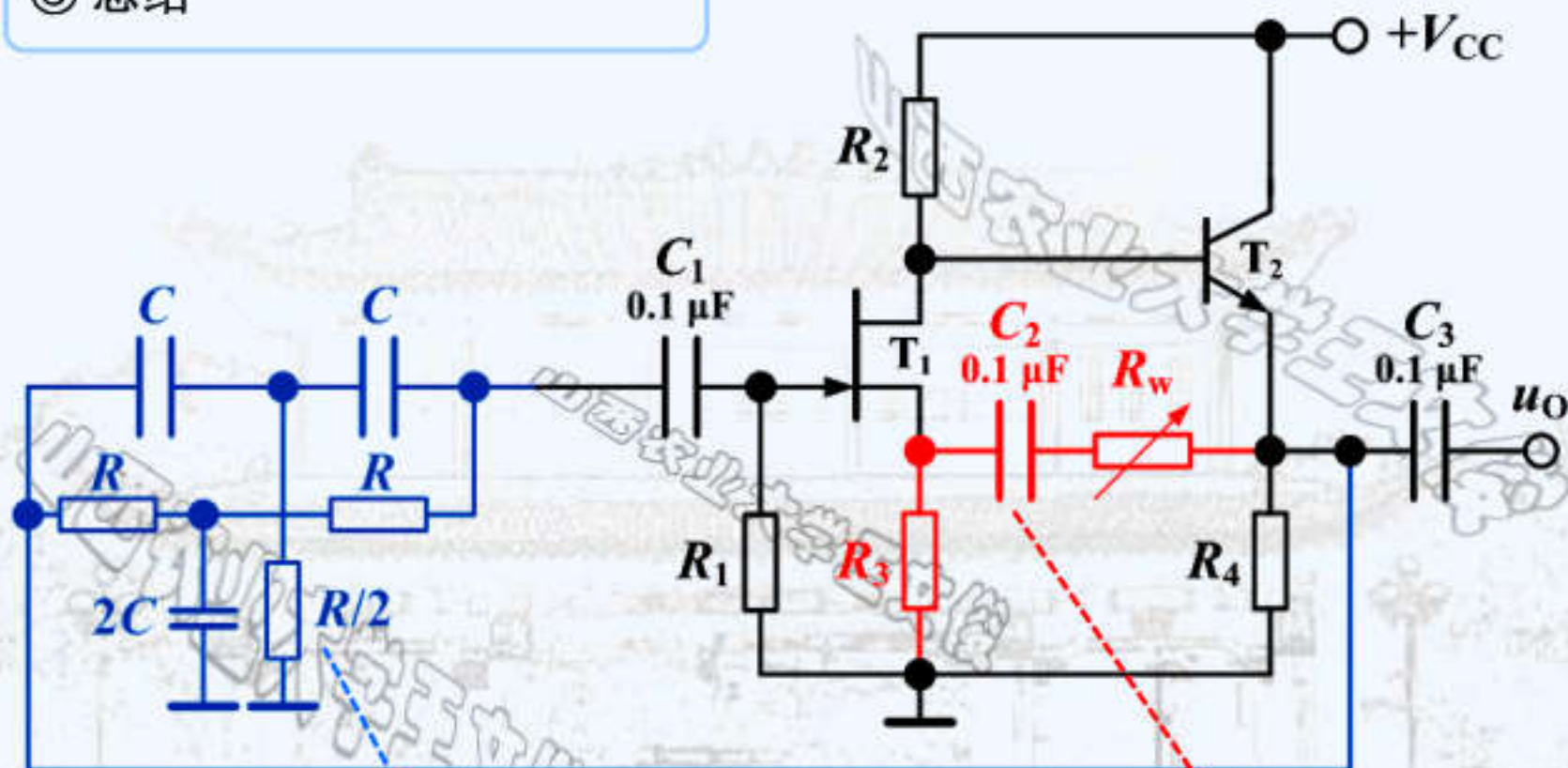
#### ② 瞬时极性法判断反馈极性





### • 3、选频网络和正反馈网络不是同一网络

#### ③ 总结



负反馈及选频网络：双 T 选频网络

正反馈网络： $R_3$ 、 $R_w$  和  $C_2$

### • 3、选频网络和正反馈网络不是同一网络

#### 正反馈

- 在放大电路的通频带内，正反馈的强度相同。
- 正反馈电压相对于输出电压没有任何附加相移。

#### 负反馈 (选频)

- 当  $f=f_0$  时，双 T 选频网络呈纯阻性，等效电阻近似为无穷大，相当于断路，负反馈作用为零；
- 其他频率时，双 T 选频网络有一定的负反馈作用，且会使输入电压相对于输出电压产生附加相移。

#### 振荡 频率

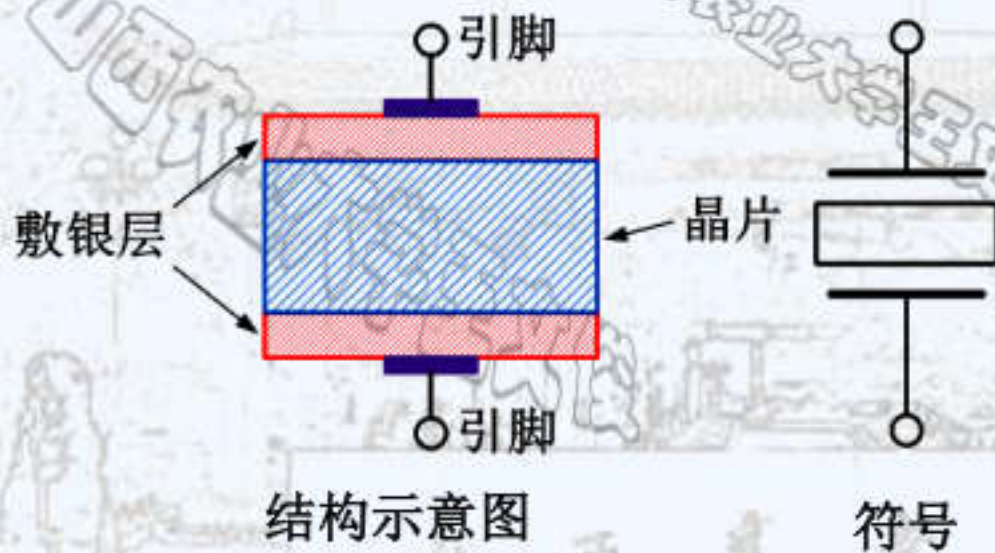
- 当  $f=f_0$  时，正反馈作用最强，且满足相位条件；
- 其他频率，存在一定的负反馈，降低电压放大倍数，同时附加相移的作用使反馈不再满足相位条件。
- 因此，电路只可能产生频率为  $f_0$  的正弦波振荡。



## 十三、石英晶体正弦波振荡电路

### • 1、石英晶体谐振器

将二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 结晶体按一定方向切割成很薄的晶片, 再将晶片两个对应的表面抛光和涂敷银层, 并作为两个极引出引脚, 加以封装, 就构成了石英晶体谐振器, 简称为石英晶体。



石英晶体谐振器具有非常稳定的固有频率。

对于振荡频率的稳定性要求高的电路, 应选用石英晶体作为选频网络。

## • 2、压电效应和压电振荡

在石英晶体的两个引脚加交变电场时，它将会产生一定频率的机械变形，而这种振动又会产生交变电场，上述物理现象称为压电效应。

一般情况下

机械振动的振幅非常小  
交变电场的振幅也非常小

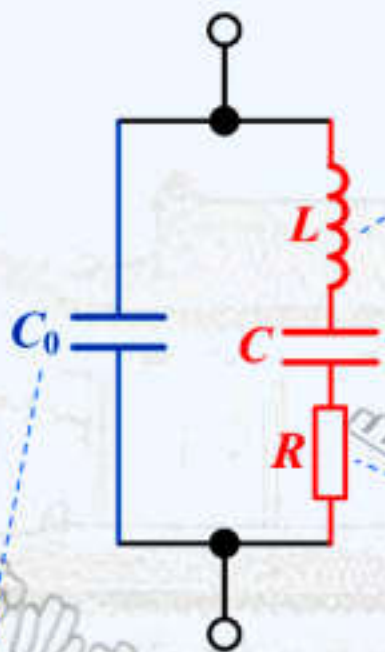
交变电场的频率为  
某一特定频率

机械振动的振幅骤然增大  
产生共振，称之为压电振荡

这一特定频率就是石英晶体的固有频率，也称为谐振频率。



### • 3、等效电路



- 机械振动的惯性等效为电感  $L$ 。
- 其值约为几毫亨到几十毫亨。
- 晶片的弹性等效为电容  $C$ 。
- 其值仅为  $0.01 \sim 0.1 \text{ pF}$ ，因此  $C \ll C_0$ 。
- 晶片的摩擦损耗等效为电阻  $R$ 。
- 其值约为  $100 \Omega$ ，理想情况下  $R = 0$ 。

- 当石英晶体不振动时，可等效为一个平板电容  $C_0$ 。
- 其值决定于晶片的几何尺寸和电极面积，一般约为几皮法到几十皮法。

## • 4、振荡频率

- $L$ 、 $C$ 、 $R$  构成  $LC$  串联谐振网络，串联谐振频率：



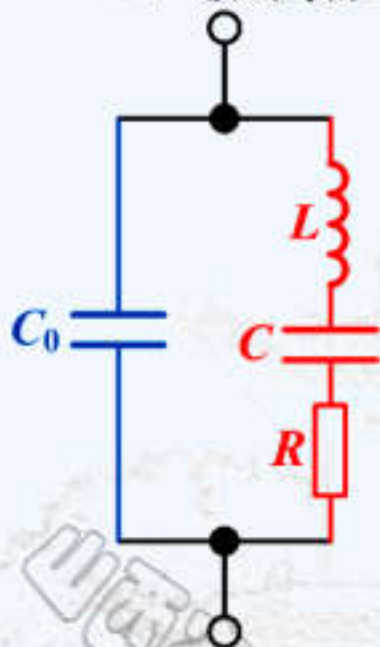
$$f_s \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- 当  $f < f_s$  时，电容  $C$  起主导作用，支路呈容性；
- 当  $f = f_s$  时，电路呈纯阻性，等效电阻为  $R$ ；
- 当  $f > f_s$  时，电感  $L$  起主导作用，支路呈感性。

山西农业大学



#### • 4、振荡频率



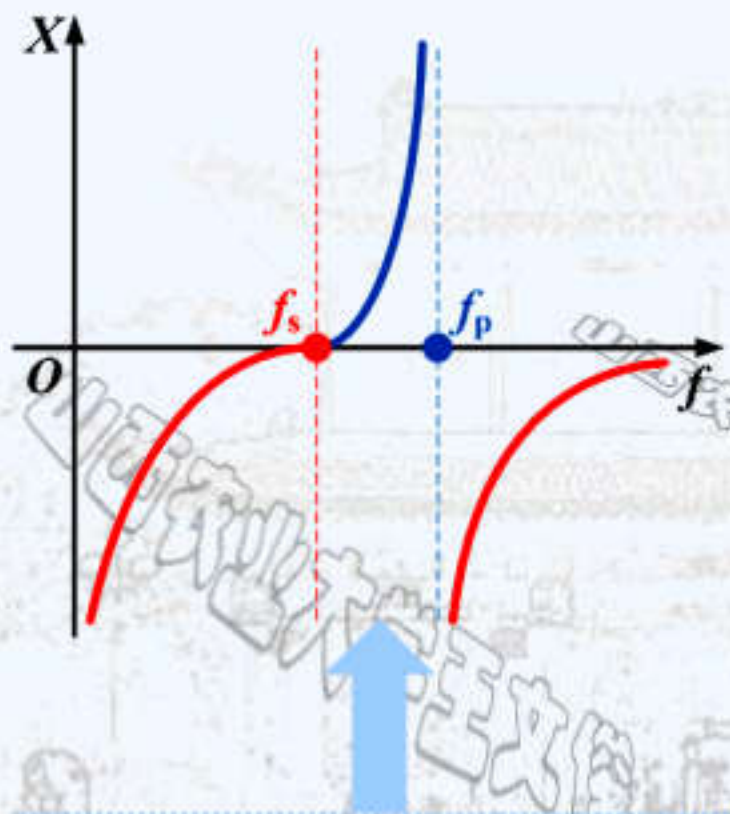
- 当  $L$ 、 $C$ 、 $R$  支路呈感性（即  $f > f_s$ ）时，整体构成  $LC$  并联谐振网络。并联谐振频率：

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{CC_0}{C+C_0}}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

- 显然  $f_p > f_s$ ，但由于  $C \ll C_0$ ，所以  $f_p \approx f_s$ 。
- ① 当  $f < f_s$  时， $C$  和  $C_0$  起主导作用，石英晶体呈容性；
- ② 当  $f = f_s$  时， $R$  和  $C_0$  并联，由于  $R \ll \omega_s C_0$ ，石英晶体呈纯阻性  $R$ ；
- ③ 当  $f_s < f < f_p$  时，石英晶体呈感性；
- ④ 当  $f = f_p$  时，石英晶体呈纯阻性，等效电阻非常大；
- ⑤ 当  $f > f_p$  时，石英晶体呈容性。

## • 4、振荡频率

当  $R = 0$  时，石英晶体电抗的频率特性如下图所示。



- 串联谐振频率  $f_s$ :

$$f_s \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- 串联谐振时，石英晶体的阻抗为零。

- 并联谐振频率  $f_p$ :

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{CC_0}{C+C_0}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

- 并联谐振时，石英晶体的阻抗无穷大。

只有在  $f_s < f < f_p$  的情况下，石英晶体才呈感性；且  $C$  和  $C_0$  的容量相差越悬殊， $f_s$  和  $f_p$  越接近，石英晶体呈感性的频带越狭窄。



## • 5、选频特性

用品质因素  $Q$  和振荡频率稳定度  $\Delta f/f_0$  来描述选频网络的选频特性。

### 品质因素

- 石英晶体的  $C$  和  $R$  的数值很小,  $L$  的数值很大, 所以  $Q$  值高达  $10^4 \sim 10^6$ 。
- 最好的  $LC$  振荡电路,  $Q$  值只能达到几百。

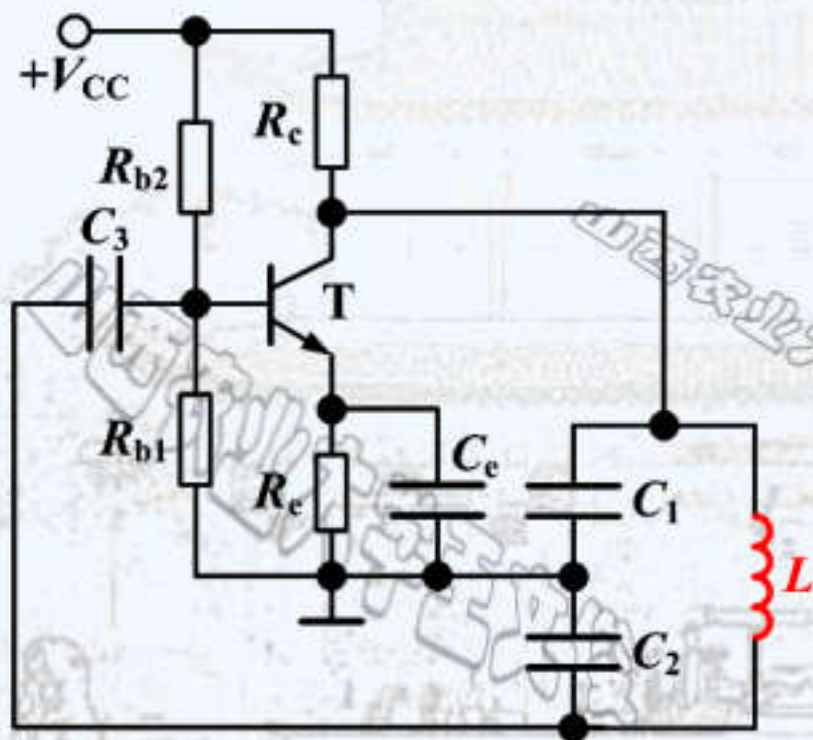
### 振荡频率稳定度

- 石英晶体振荡频率几乎仅决定于晶片的尺寸, 所以其稳定度可达  $10^{-8} \sim 10^{-6}$ , 一些产品甚至高达  $10^{-11} \sim 10^{-10}$ 。
- 最好的  $LC$  振荡电路, 振荡频率稳定度只能达到  $10^{-5}$ 。

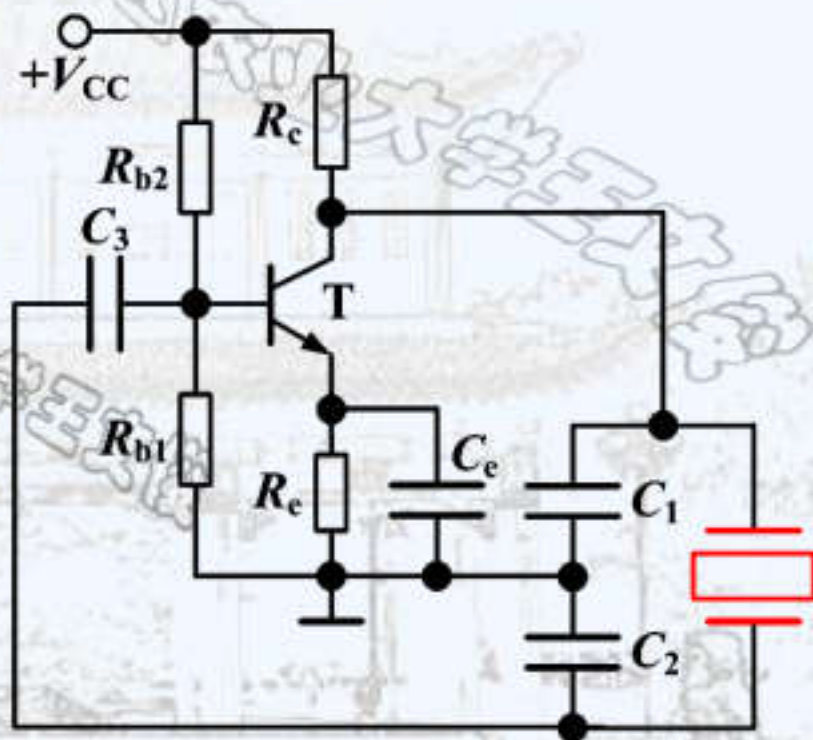
石英晶体的选频特性是其他选频网络无法比拟的。

## • 6、并联型石英晶体振荡电路

用石英晶体取代电容反馈式振荡电路中的电感，就得到并联型石英晶体正弦波振荡电路。



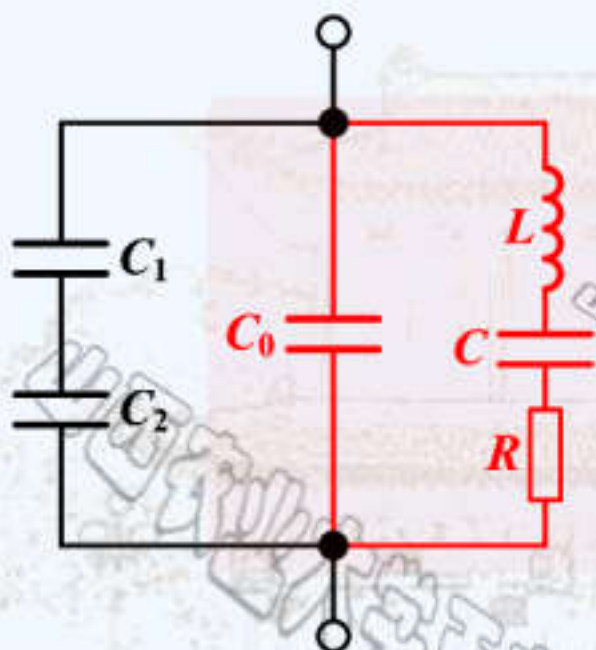
电容反馈式振荡电路



并联型石英晶体振荡电路



## • 6、并联型石英晶体振荡电路



- ① 当  $f < f_s$  时，石英晶体呈容性，等效为电容并联，无法产生振荡；
- ② 当  $f = f_s$  时，石英晶体呈纯阻性，等效为电容和电阻并联，无法产生振荡；
- ③ 当  $f_s < f < f_p$  时，石英晶体呈感性，可以与  $C_1$  和  $C_2$  构成并联谐振网络；
- ④ 当  $f = f_p$  时，石英晶体呈纯阻性，等效为电容和电阻并联，无法产生振荡；
- ⑤ 当  $f > f_p$  时，石英晶体呈容性，等效为电容并联，无法产生振荡。

电路只可能产生并联谐振，且振荡频率在  $f_s$  和  $f_p$  之间。

## • 6、并联型石英晶体振荡电路

- 电容  $C_1$ 、 $C_2$  与  $C_0$  并联，并联后的电容为：

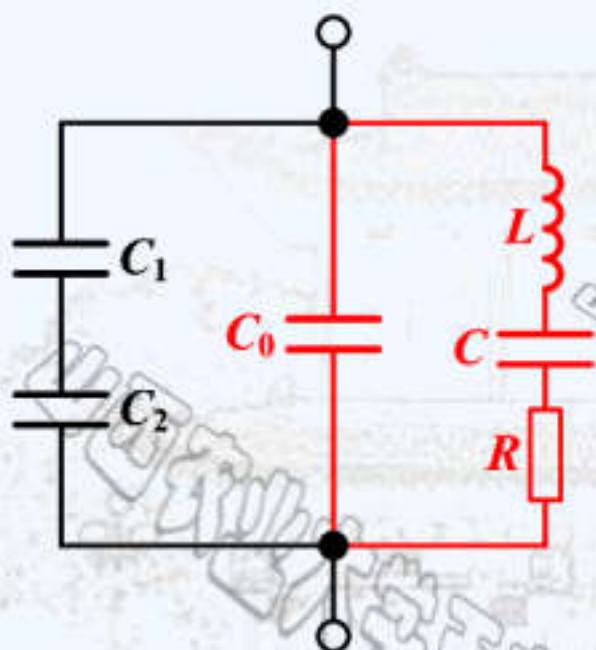
$$C'_0 = C_0 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} > C_0$$

- 由于  $C \ll C_0 < C'_0$ ，因此总电容：

$$C' = \frac{CC'_0}{C + C'_0} = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C'_0}} \approx C$$

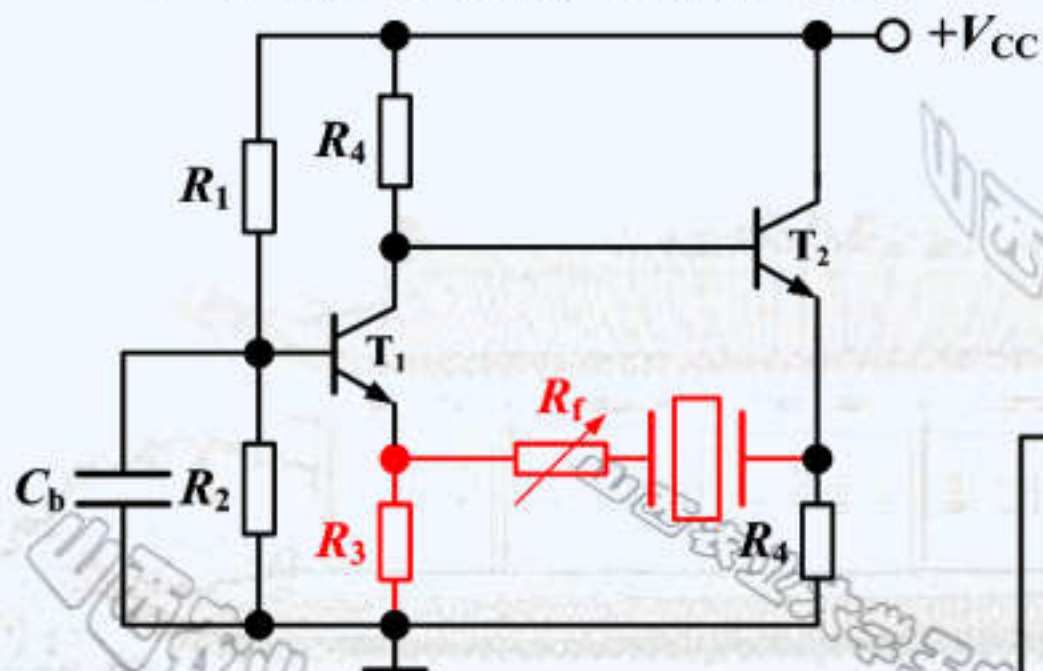
- 振荡频率：

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx f_s \approx f_p$$



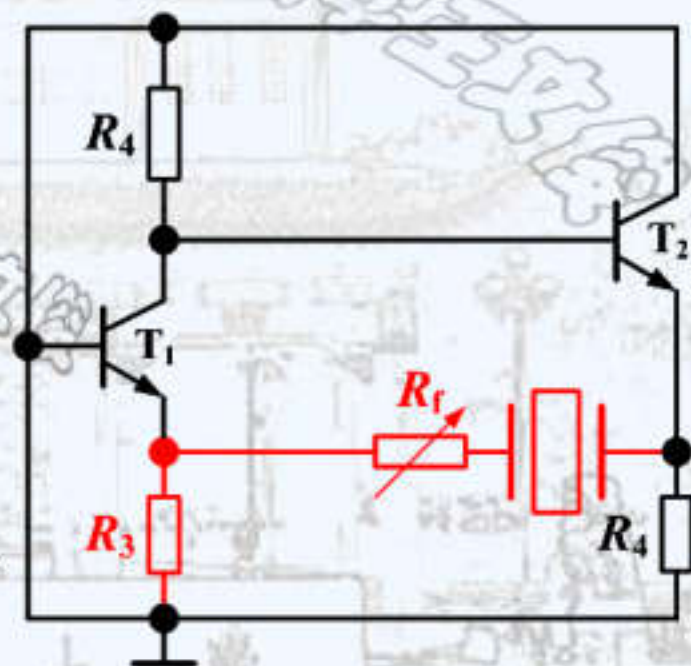


## 6、串联型石英晶体振荡电路



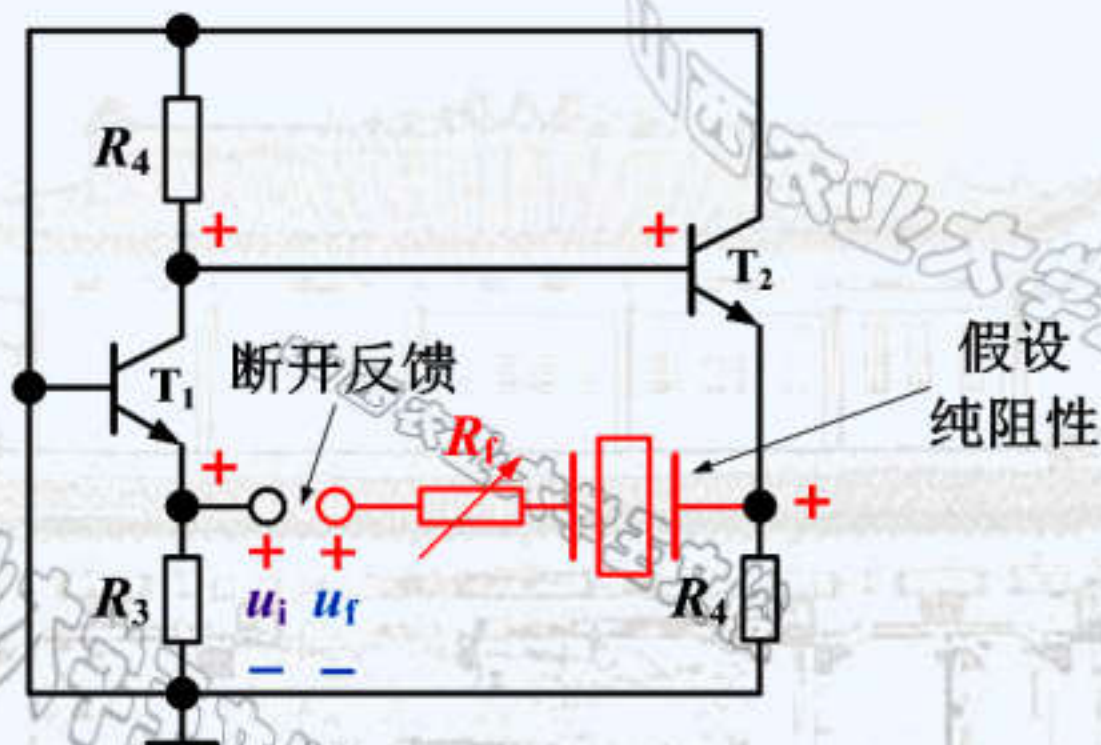
串联型石英晶体振荡电路

旁路电容  $C_b$  短路  
电源  $+V_{CC}$  接地



交流通路

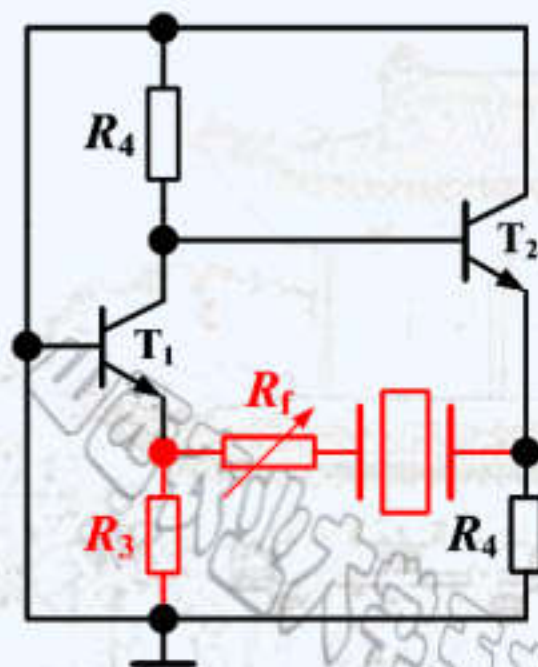
## • 6、串联型石英晶体振荡电路



当石英晶体呈纯阻性时，满足正弦波振荡的相位条件。



## • 6、串联型石英晶体振荡电路



- ① 当  $f < f_s$  时，石英晶体呈容性，不满足相位条件，无法产生振荡；
- ② 当  $f = f_s$  时，石英晶体呈纯阻性，满足相位条件，且正反馈作用最强；
- ③ 当  $f_s < f < f_p$  时，石英晶体呈感性，不满足相位条件，无法产生振荡；
- ④ 当  $f = f_p$  时，石英晶体呈纯阻性，满足相位条件；但阻抗非常大，正反馈通路近似为开路，无法产生振荡；
- ⑤ 当  $f > f_p$  时，石英晶体呈容性，不满足相位条件，无法产生振荡。

电路只可能产生串联谐振，振荡频率为石英晶体的串联谐振频率  $f_s$ 。