


## 9 信号发生器

模拟电子技术主要分以下三个部分：

- 
- 信号的处理 ( 1/2/3/4/5/6/7/9章)
  - 信号的产生 (8章)
  - 直流稳压电源 (10章)

## 发生器按产生的波形特点可分为



应用：各类信号源、电子琴等

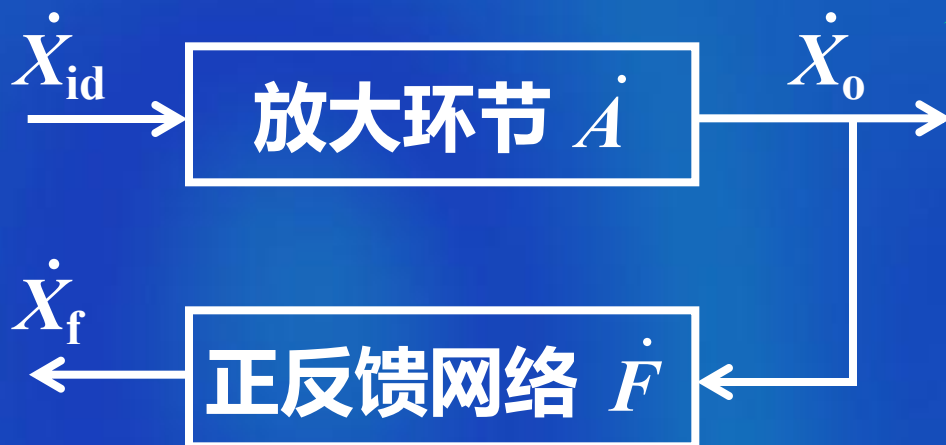
## 9.1 正弦波信号发生器

正弦波信号发生器是按照自激振荡原理构成的。

信号发生器常称为振荡器。

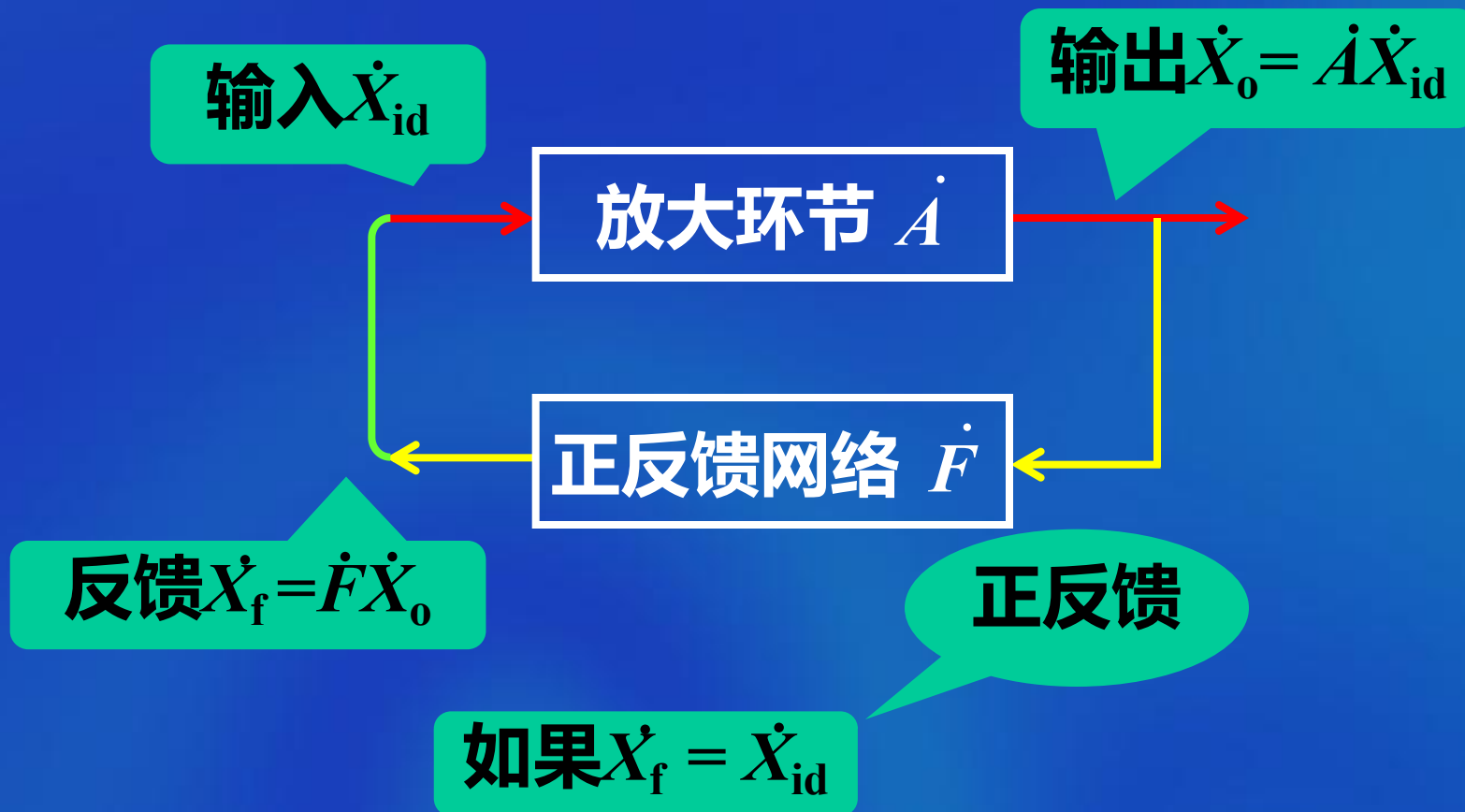
### 9.1.1 正弦波自激振荡的基本原理

#### 1. 产生正弦波自激振荡的平衡条件



自激振荡  
原理方框图

# 工作原理



可在输出端继续维持原有的输出信号

输入  $\dot{X}_{id}$

输出  $\dot{X}_o = \dot{A}\dot{X}_{id}$

如果  $\dot{X}_f = \dot{X}_{id}$

放大环节  $\dot{A}$

正反馈网络  $\dot{F}$

反馈  $\dot{X}_f = \dot{F}\dot{X}_o$

由  $\dot{X}_f = \dot{F}\dot{X}_o = \dot{A}\dot{F}\dot{X}_{id}$

及  $\dot{X}_f = \dot{X}_{id}$

知电路产生自激振荡的平衡条件为

$$\dot{A}\dot{F} = 1$$

式  $\dot{A}\dot{F} = 1$  中

$$\dot{A} = A \angle \varphi_A$$

$$\dot{F} = F \angle \varphi_F$$

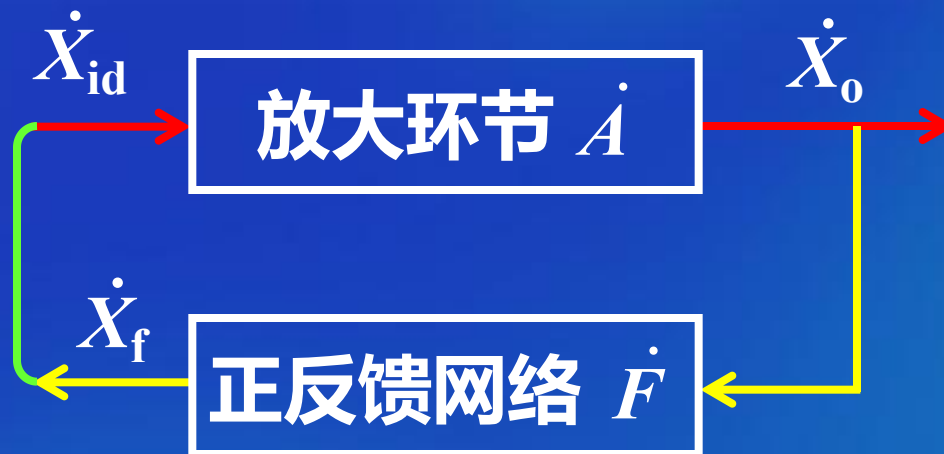
上式可分解为

(1) 幅度平衡条件

$$AF = 1$$

(2) 相位平衡条件

$$\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



## 平衡条件讨论

### a. 相位平衡条件

一个振荡器，只在振荡频率 $f_0$ 时满足相位平衡的条件。

在电路中应包含选频网络



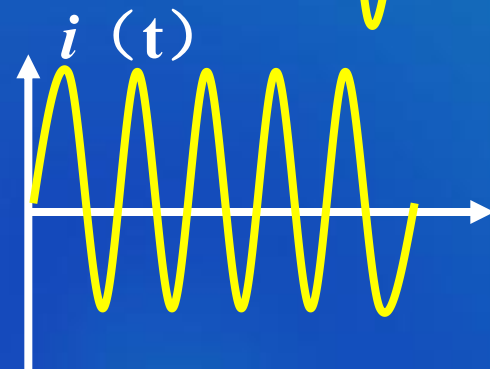
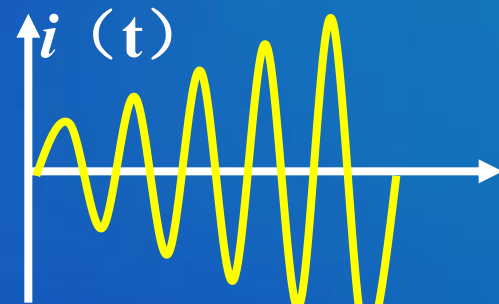
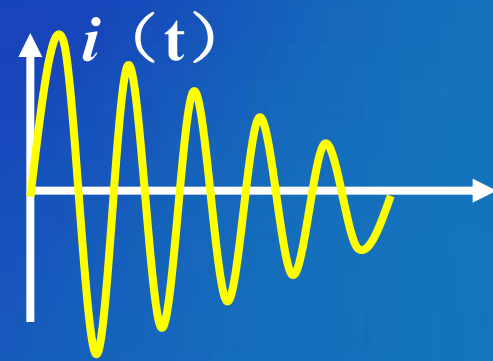
## b. 幅度平衡条件

若  $AF$  则电路减幅振荡，最后停振荡。

若  $AF > 1$  电路增幅振荡。

若  $AF = 1$  电路等幅振荡。

**$AF=1$  维持等幅振荡的唯一条件**





## 2. 振荡的建立与稳定

$\dot{A}\dot{F}=1$ 只能维持振荡，但不能建立振荡

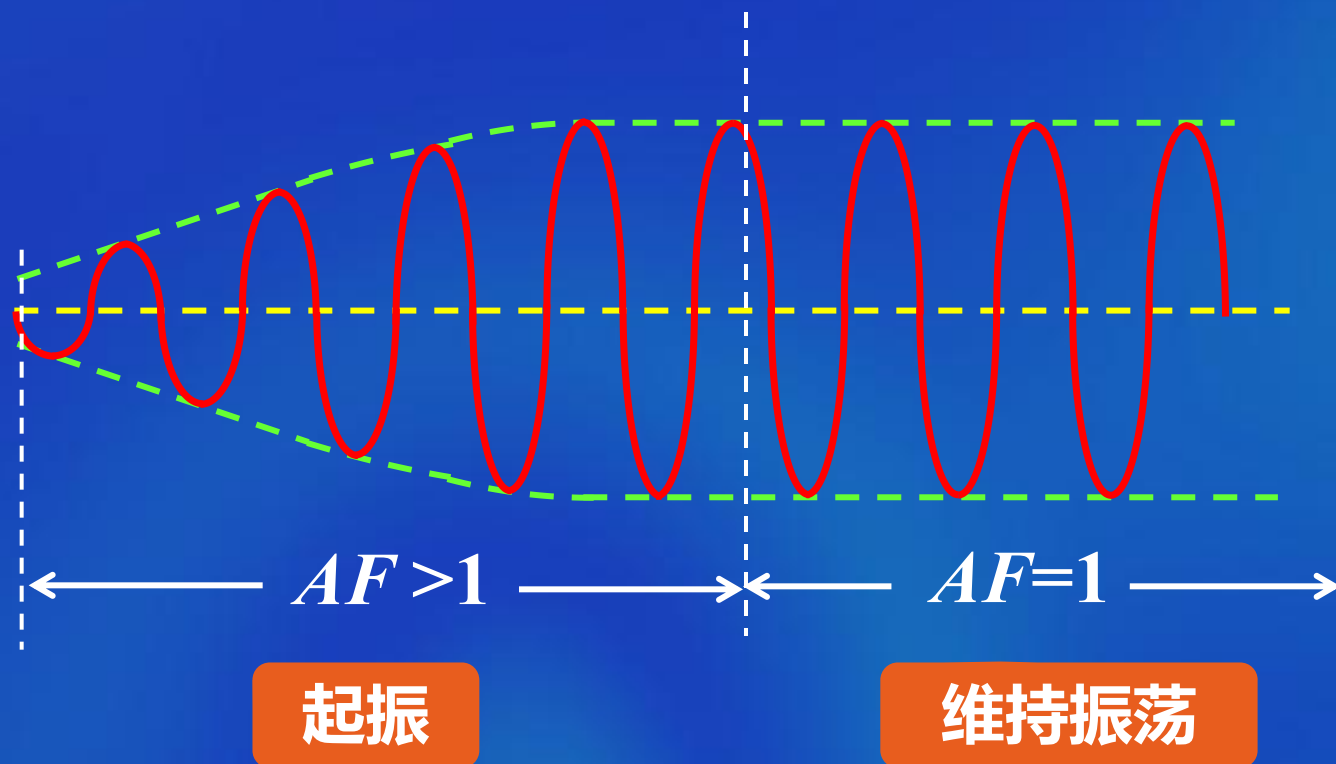
振荡电路的起振条件

$$\dot{A}\dot{F} > 1 \begin{cases} AF > 1 \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}$$

$\dot{A}\dot{F} > 1$  将使输出幅值越来越大，出现非线性失真。

放大电路中还应包含稳幅环节

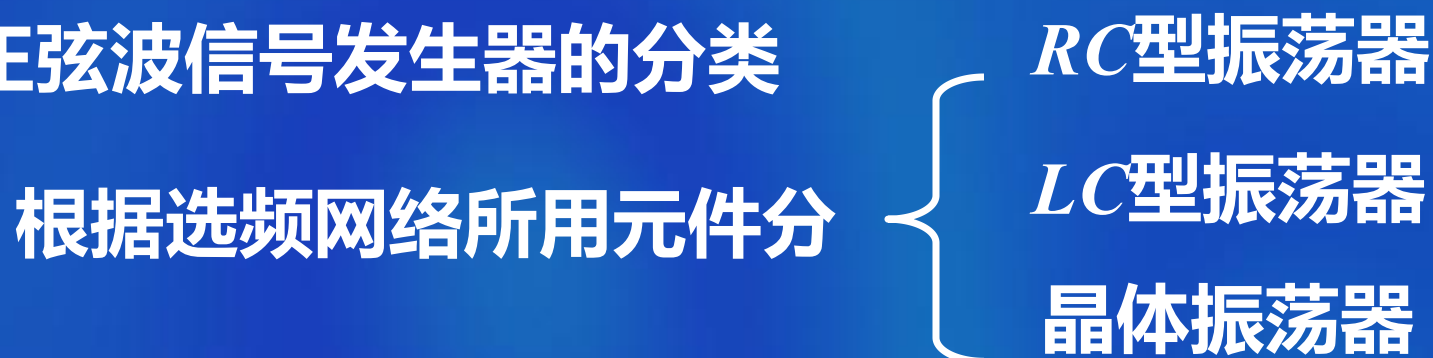
## 自激振荡电路的建立过程



### 3. 正弦波信号发生器组成



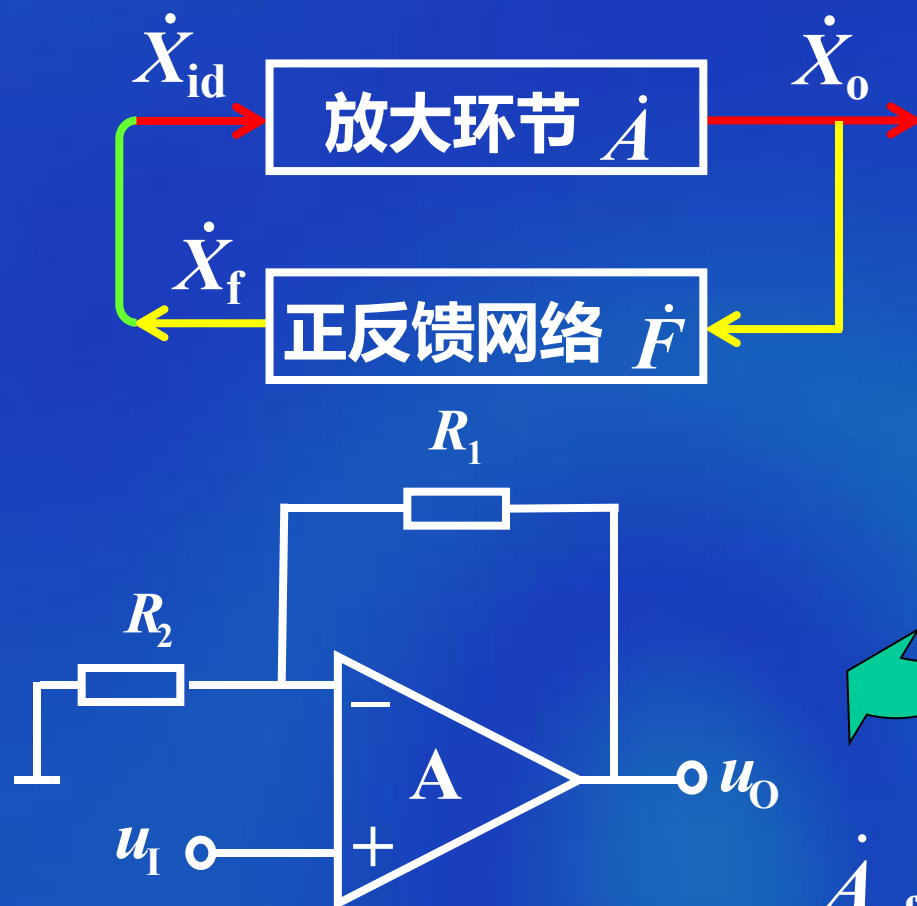
### 4. 正弦波信号发生器的分类



## 9.1.2 RC 型正弦波信号发生器

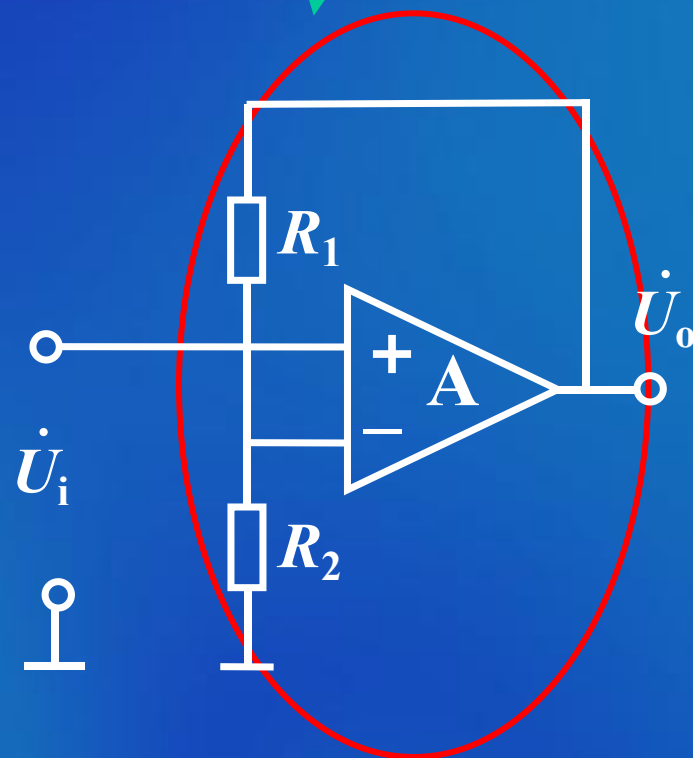


# 1. 文氏电桥振荡器

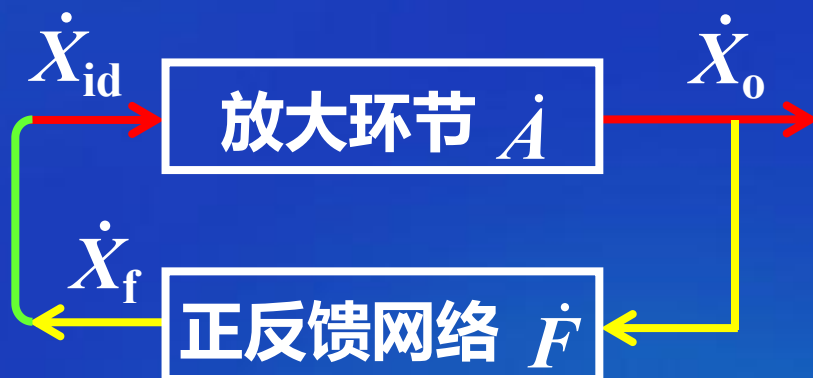


$$\dot{A}_{uf} \approx 1 + R_1/R_2$$

放大电路

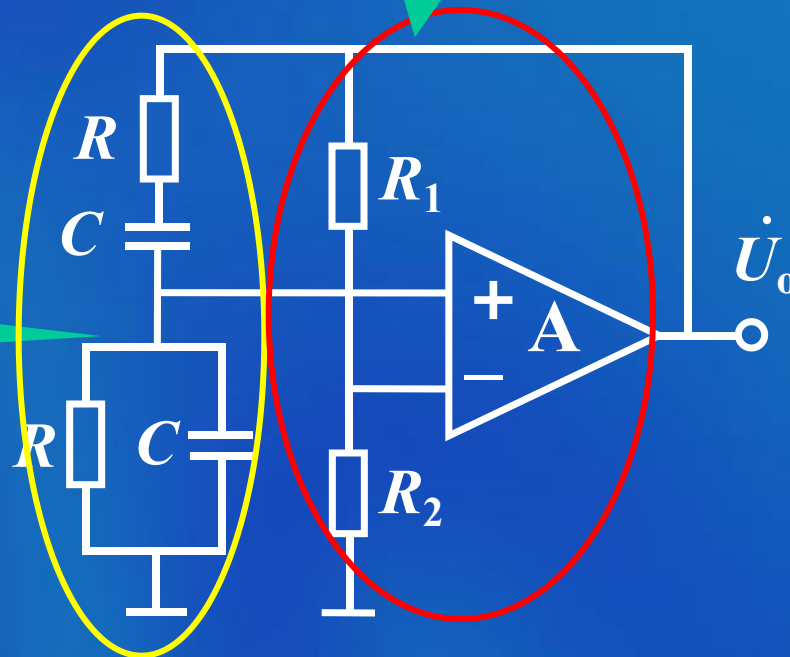


# 1. 文氏电桥振荡器

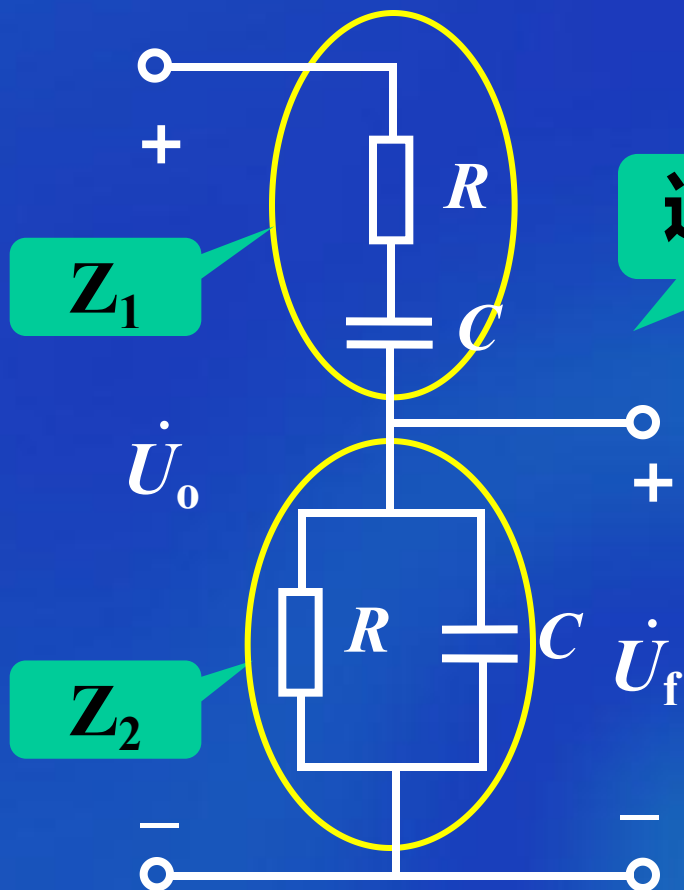


**选频网络**  
**正反馈网络**

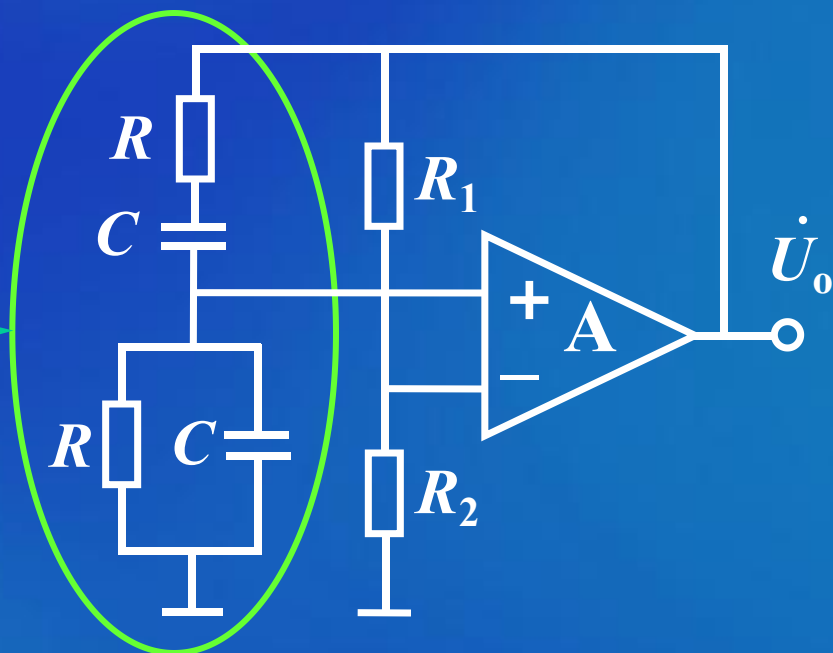
**放大电路**



## 2. RC串并联网络的选频特性



选频网络

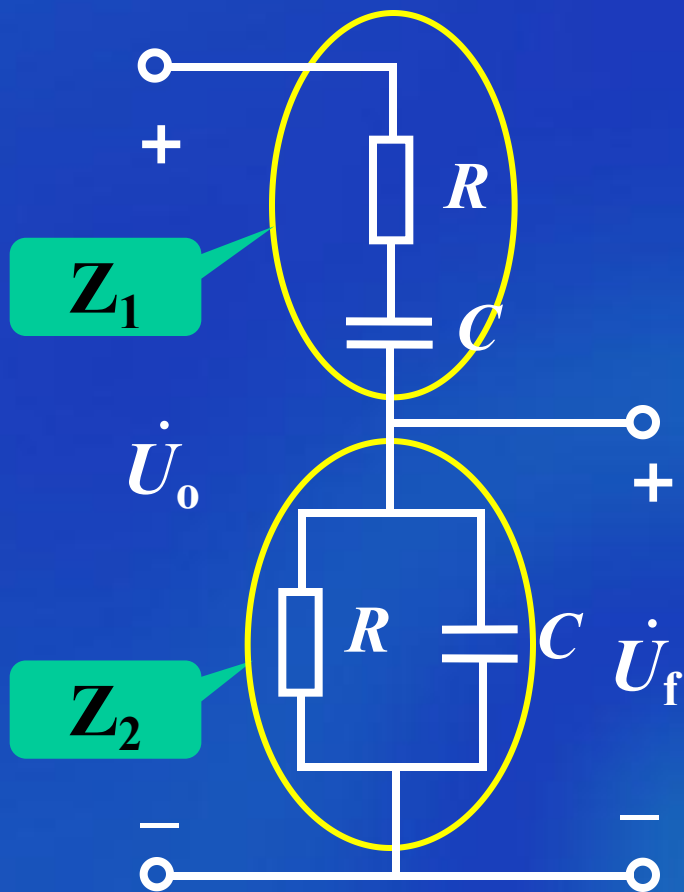


图中

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_2 = R // \frac{1}{j\omega C}$$

## 反馈系数



$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_0}$$

$$= \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$= \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{(R + \frac{1}{j\omega C}) + R // \frac{1}{j\omega C}}$$

$$= \frac{1}{3 + j(\omega CR - \frac{1}{\omega CR})}$$



即  $\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{1}{3 + j(\omega CR - \frac{1}{\omega CR})}$

令  $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}$$

由此可得  $\dot{F}$  的幅频特性与相频特性

# 幅频特性

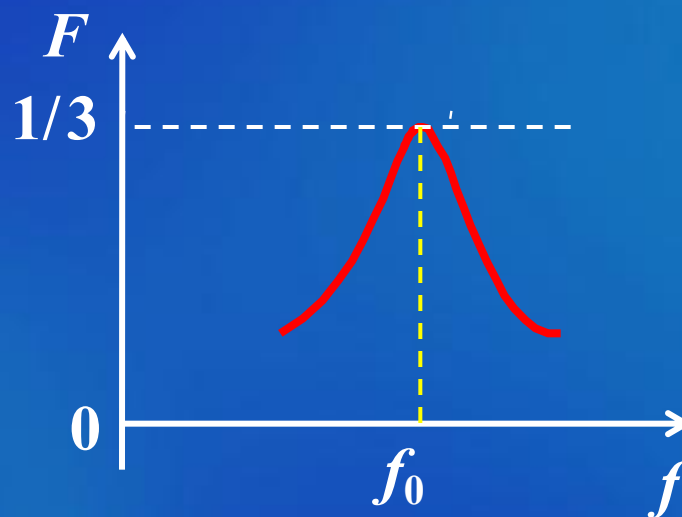
$$F = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

当 $\omega \rightarrow 0$ 时,  $F \rightarrow 0$

当 $\omega \rightarrow \infty$ 时,  $F \rightarrow 0$

当 $\omega = \omega_0$ ,  $F = F_{\max} = 1/3$

## 幅频特性曲线



# 相频特性

$$\varphi_F = -\arctg \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}{3}$$

当  $\omega \rightarrow 0$  时,  $\varphi_F \rightarrow 90^\circ$

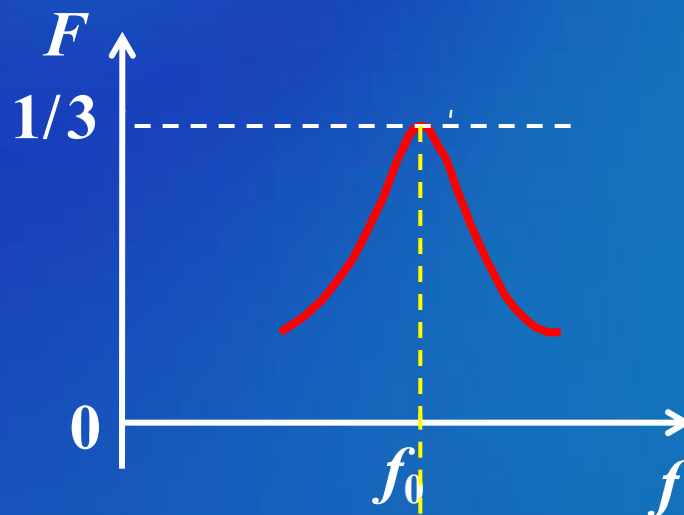
当  $\omega \rightarrow \infty$  时,  $\varphi_F \rightarrow -90^\circ$

当  $\omega = \omega_0$  时,  $\varphi_F \rightarrow 0^\circ$

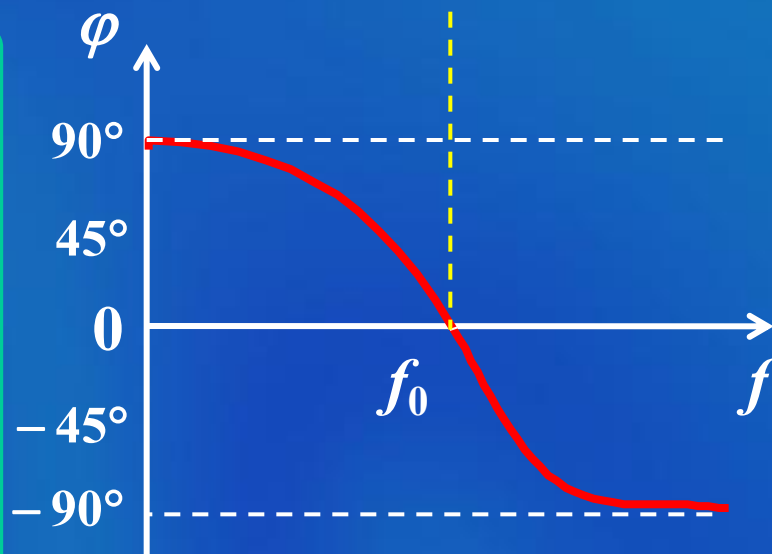
可见, 当  $\omega = \omega_0$  时

$\varphi_F = 0^\circ$ , 且反馈**最强**

## 幅频特性曲线



## 相频特性曲线

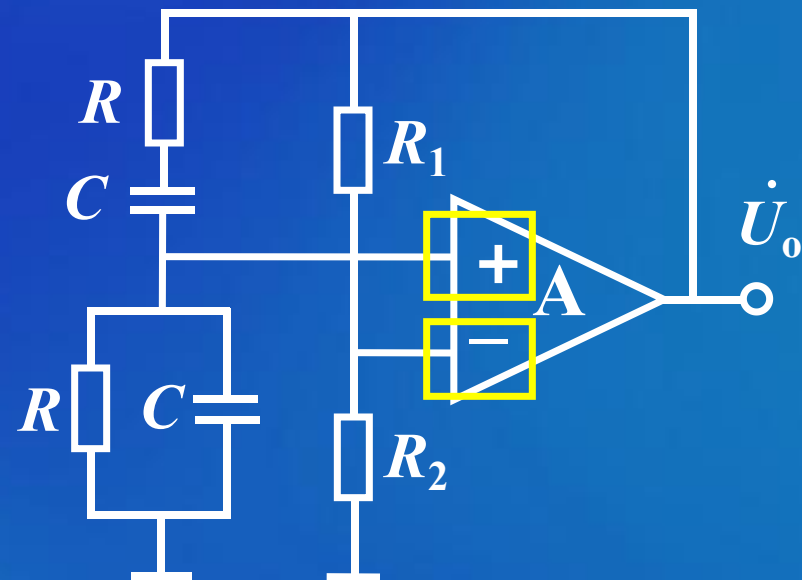


### 3. 工作原理

(1) 当  $f = f_0$  时

$\dot{U}_f$  与  $\dot{U}_o$  同相位  $\dot{U}_f$  的幅值最大

即  $\dot{U}_f = \dot{U}_o / 3$   $F = F_{\max} = 1/3$



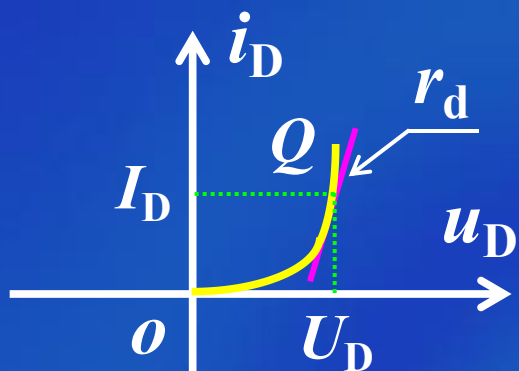
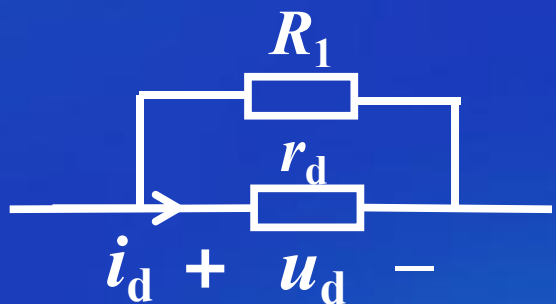
而  $AF \geq 1$ , 电路才能振荡。

(2) 当  $A = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \geq 3$  时, 满足振荡条件  $R_1 \geq 2R_2$

(3) 振荡频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

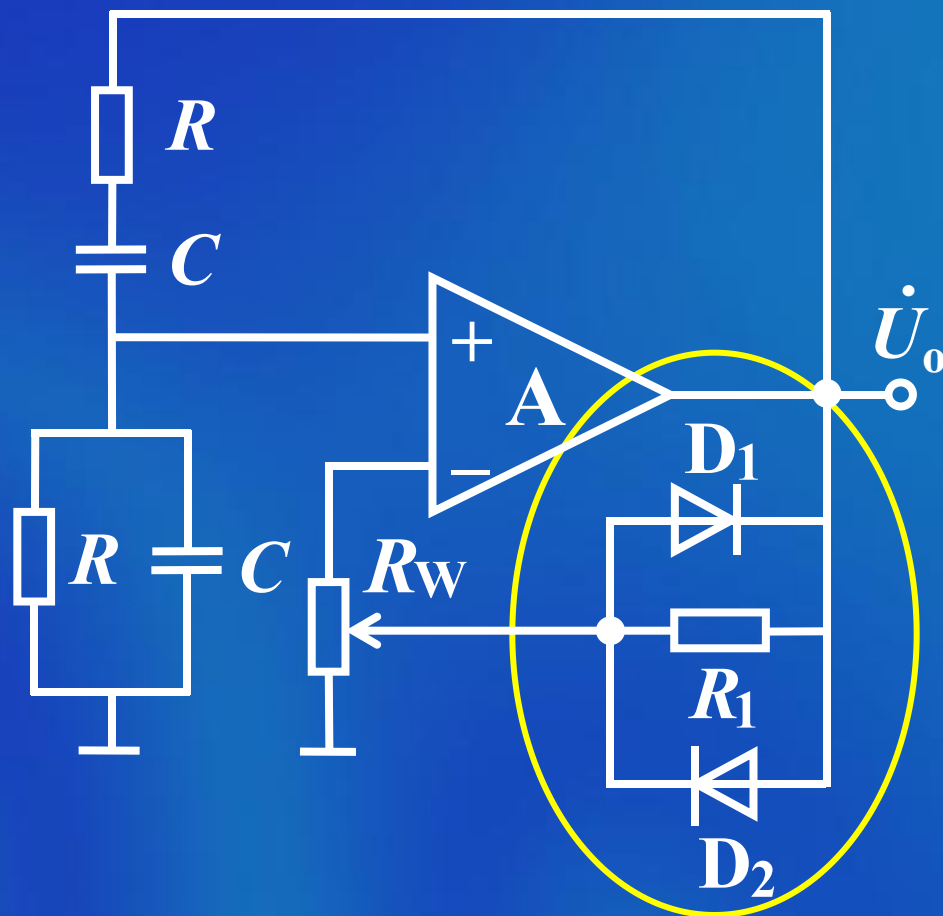
## 4. 稳幅措施

### (1) 利用二极管稳幅

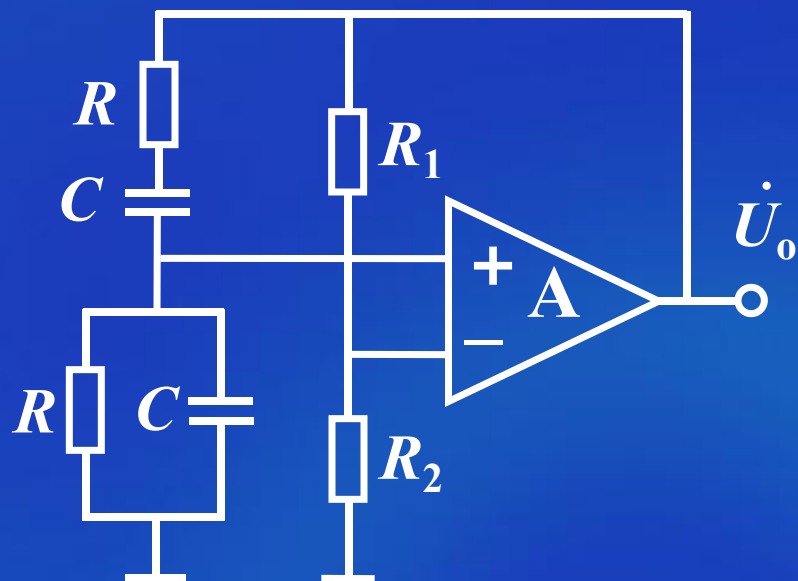


动态电阻

$$r_d = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_{u_D=U_D, i_D=I_D}$$



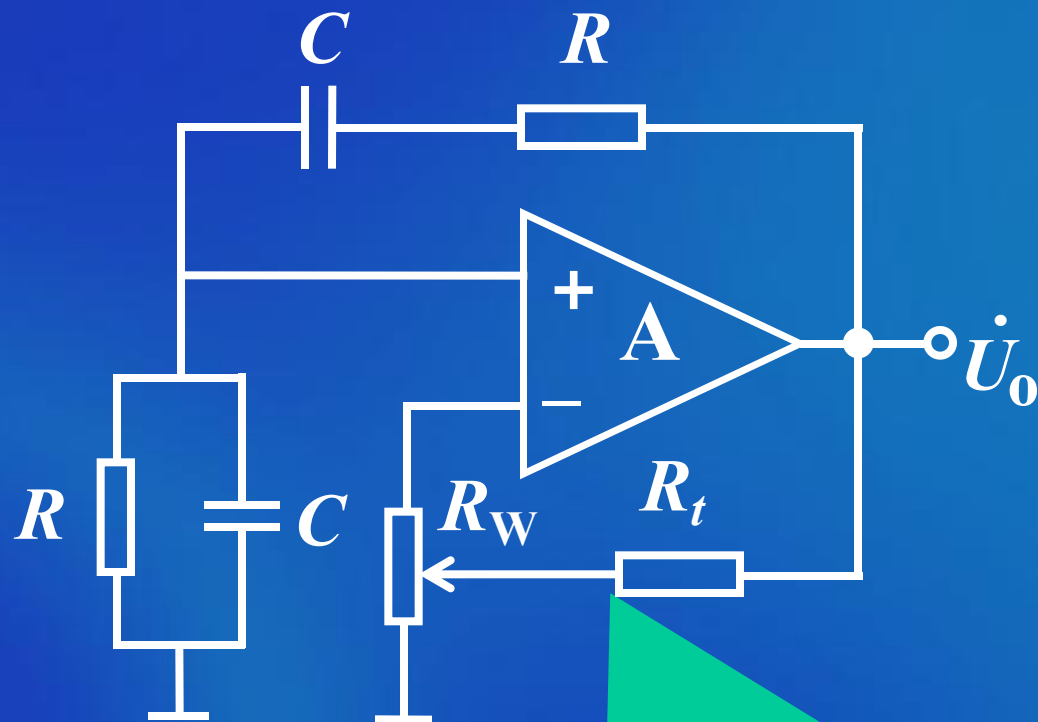
## (2) 利用非线性热敏电阻稳幅



$$A = 1 + \frac{R_1}{R_2} \geq 3$$

$R_1$  ---  $R_t$  负温度系数

$R_2$  ---  $R_t$  正温度系数



$R_t$  为负温度系数的热敏电阻

## 文氏电桥振荡器的主要特点:

- a. 频率易改变（双联电位器或电容器），频率范围广；
- b. 高频时减小 $RC$ 值会加重放大电路负载，且电路存在分布电容，电容 $C$ 的减小会受到限制；
- c. 普通运放带宽有限，故振荡频率一般不超过1MHz。

### 9.1.3 $LC$ 型正弦波信号发生器

**主要特点:**

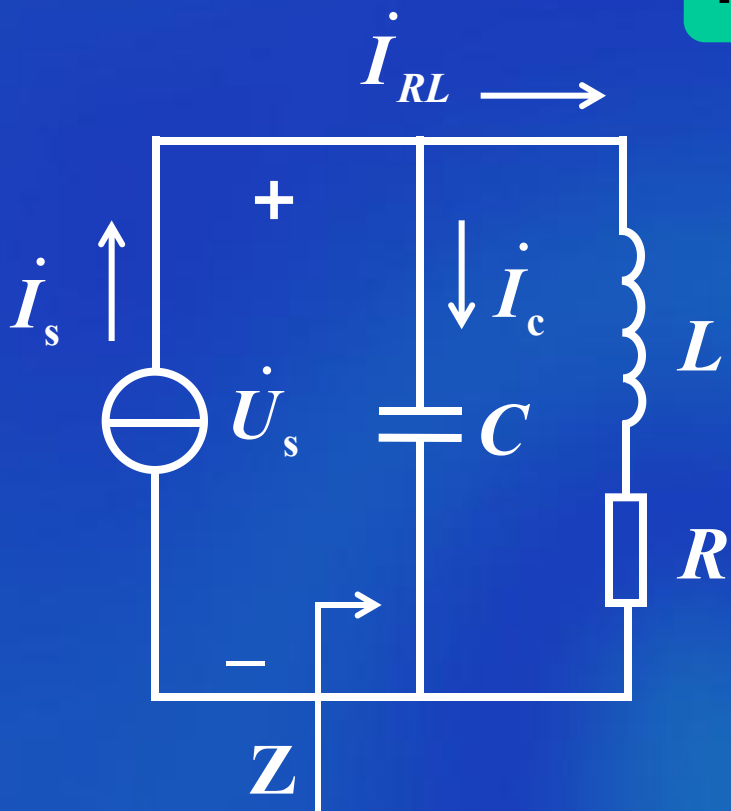
- a. 用 $LC$ 并联谐振回路作为选频网络。
- b. 主要用来产生1MHZ以上的高频信号。
- c. 频率稳定性好。



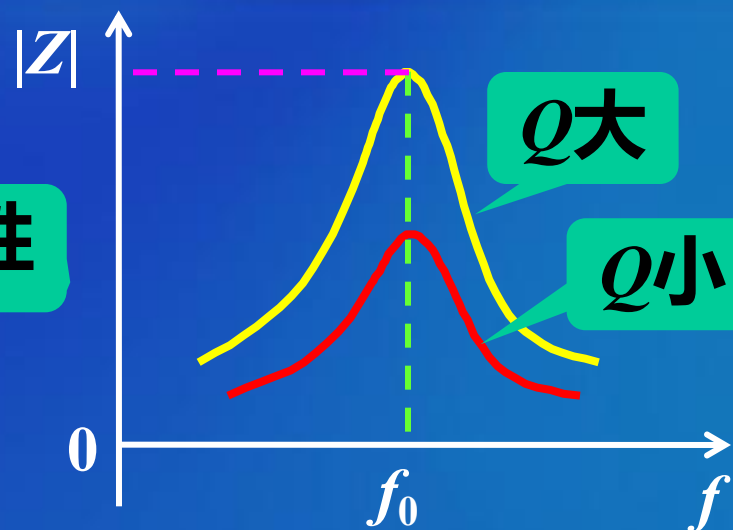
## $LC$ 型正弦波信号发生器类型



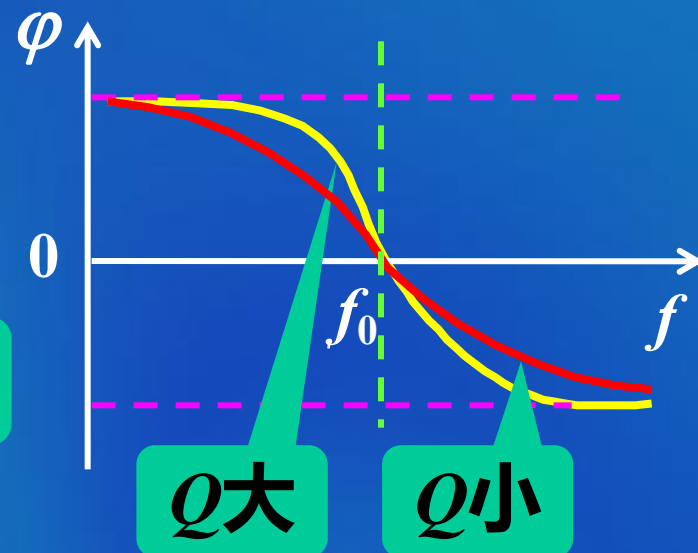
# 1. LC 并联谐振回路



阻抗频率特性



相频特性



## (1) 谐振频率

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

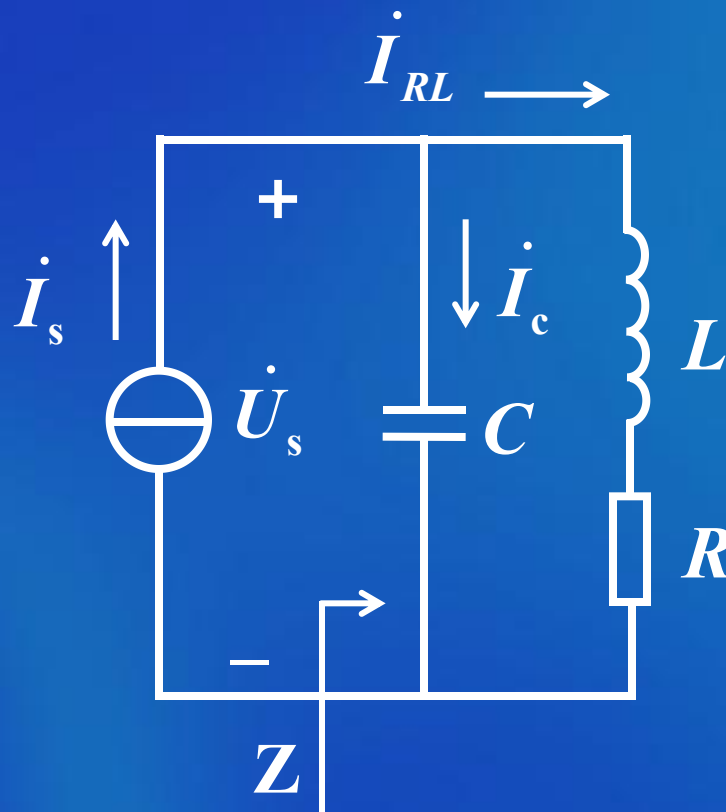
## (2) 谐振时的等值电阻 $R_0$

$$R_0 = \frac{U_s}{I_s} = \frac{L}{RC}$$

$$R_0 = \max|Z|$$

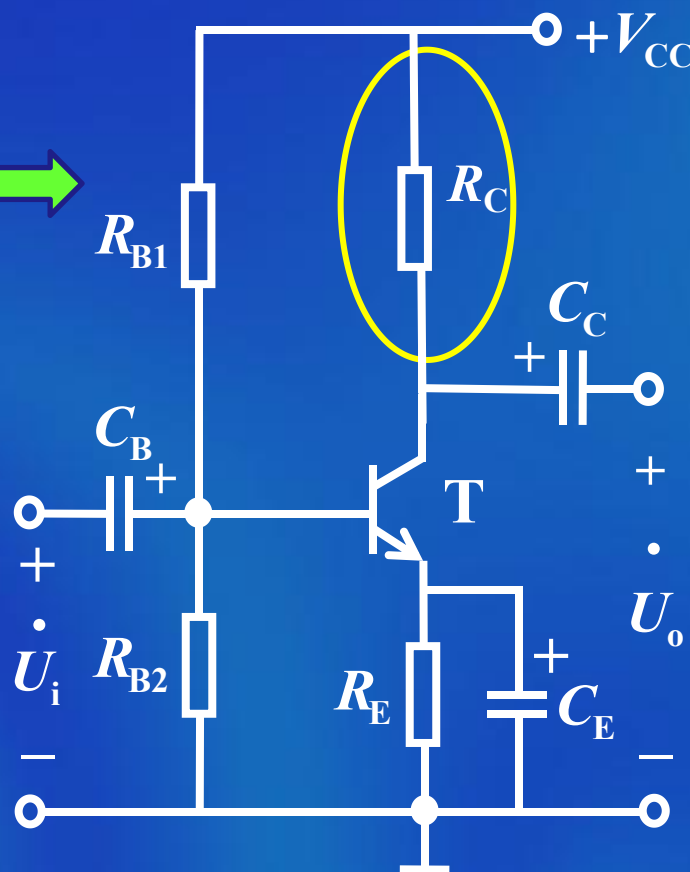
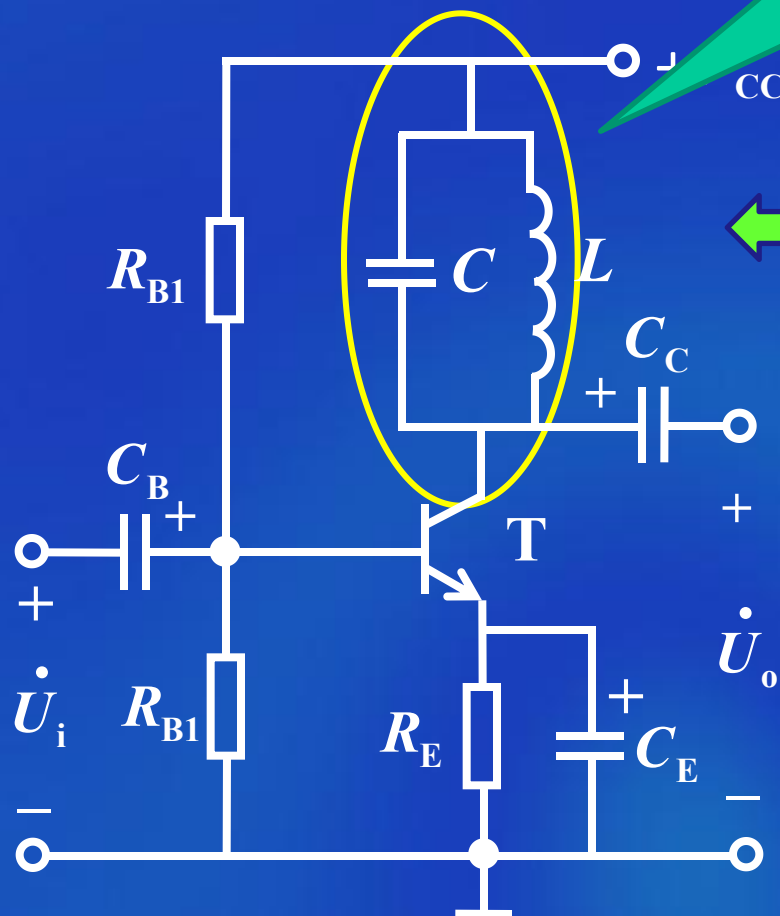
## (3) 电路的品质因数

$$Q = \frac{I_C}{I_S} = \frac{\omega_0 L}{R} \gg 1$$



## 2. 选频放大电路

### LC并联谐振电路



$$|A| = \beta \frac{R_C}{r_{be}}$$



$$|A| = \beta \frac{R_0}{r_{be}}$$

# 工作原理

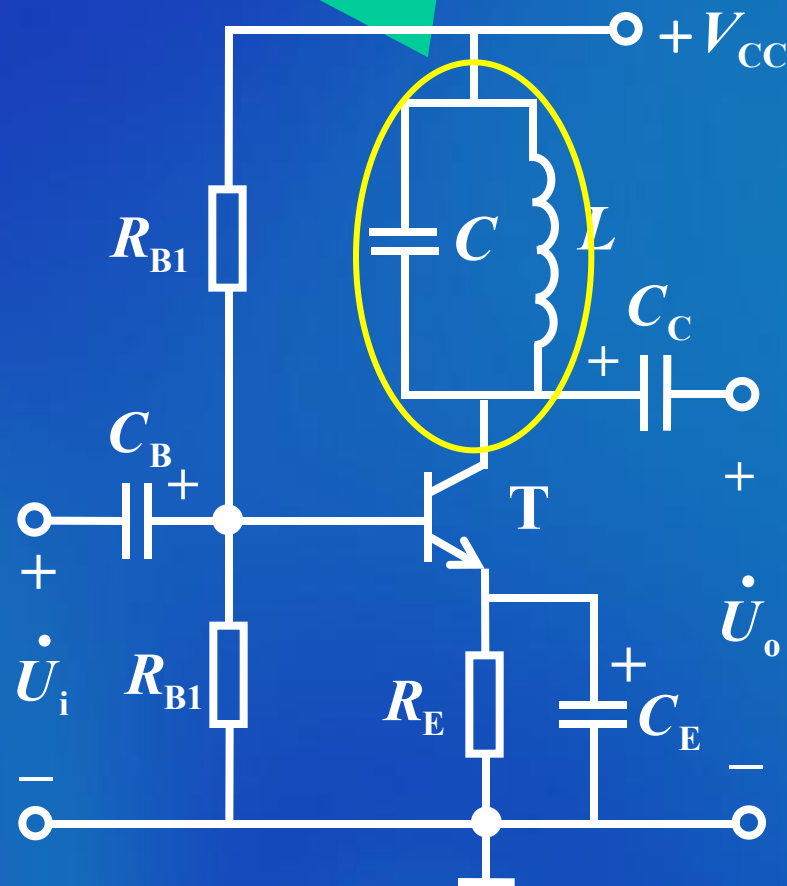
当 $f = f_0$ （ $LC$ 并联谐振频率）时

等值电阻  $R_0$  达到极大值。

（1）输出电压幅值最大。

（2）输出与输入电压反相。

## $LC$ 并联谐振电路



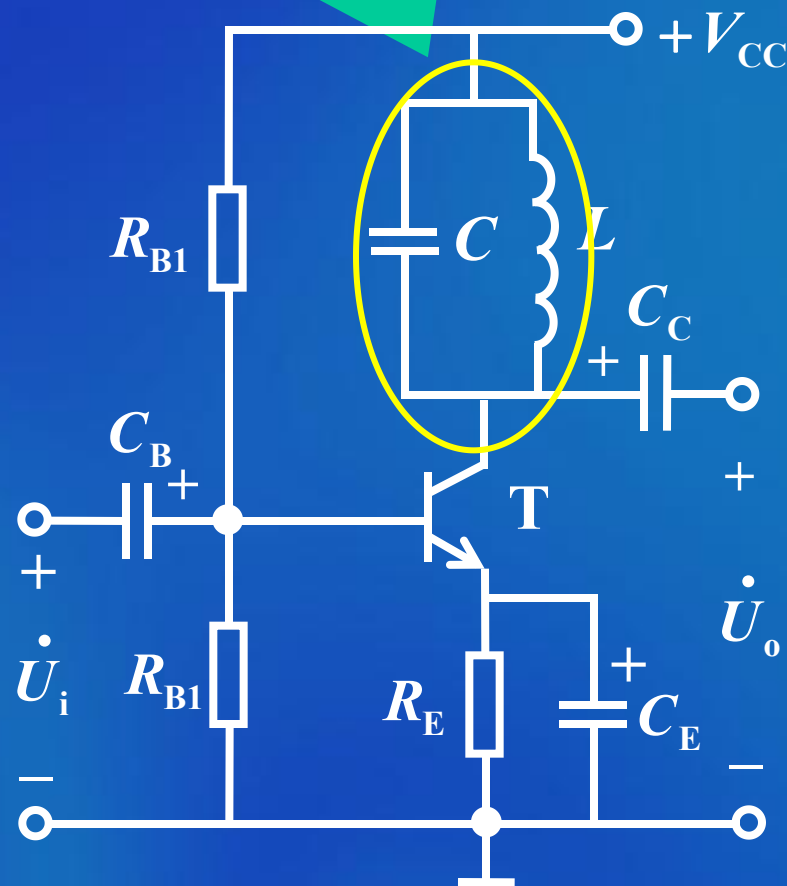
## LC并联谐振电路

当  $f \neq f_0$  (  $LC$  并联谐振频率 ) 时

等值电阻  $R_0$  较小, 输出电压幅值也很小。

放大电路只对谐振频率  $f_0$  的信号有放大作用

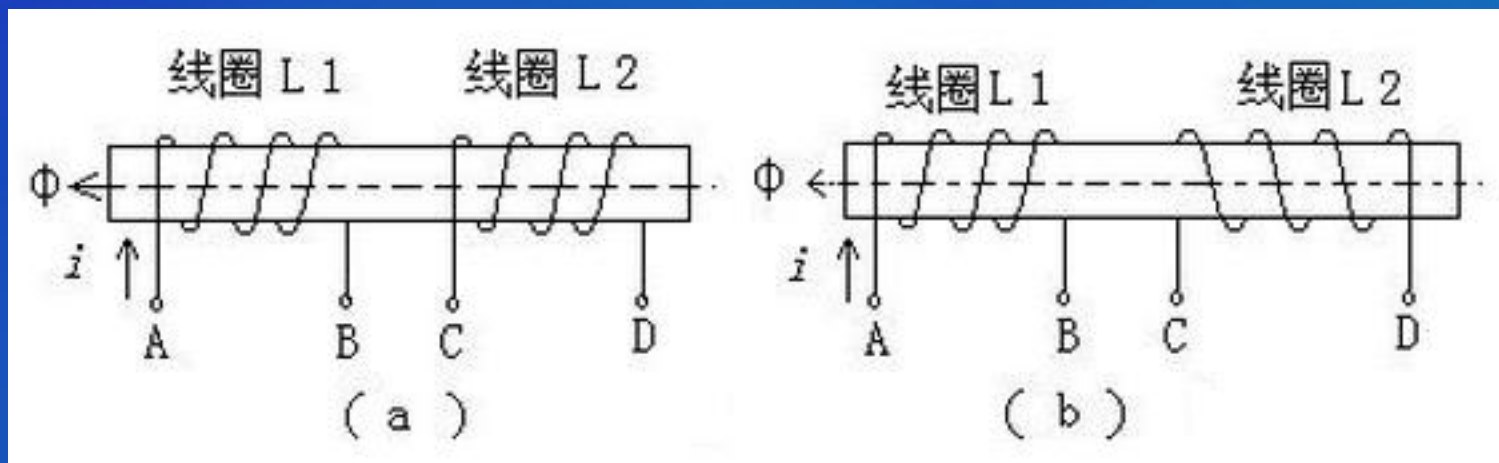
选频放大电路



### 3. 变压器反馈式LC振荡电路

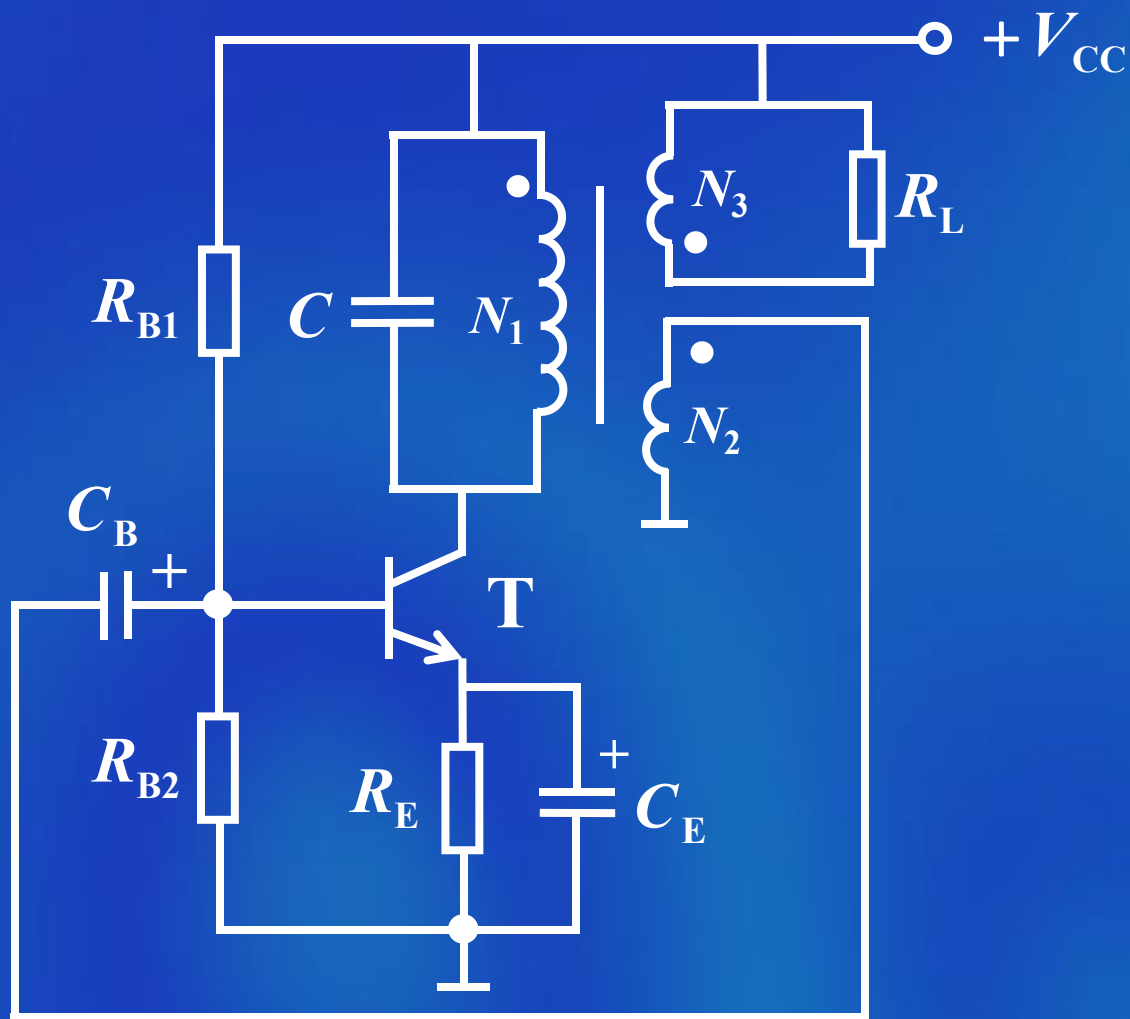
变压器线圈同名端的判别：

在变压器同一铁芯上的不同绕组，在同一磁势作用下，产生同样极性感应电势的出线端，称为变压器的同名端，反之就是异名端。



(a) A与C为同名端；B与D为同名端。(b) A与D为同名端；B与C为同名端。

# 变压器反馈式LC振荡电路





# (1) 相位条件

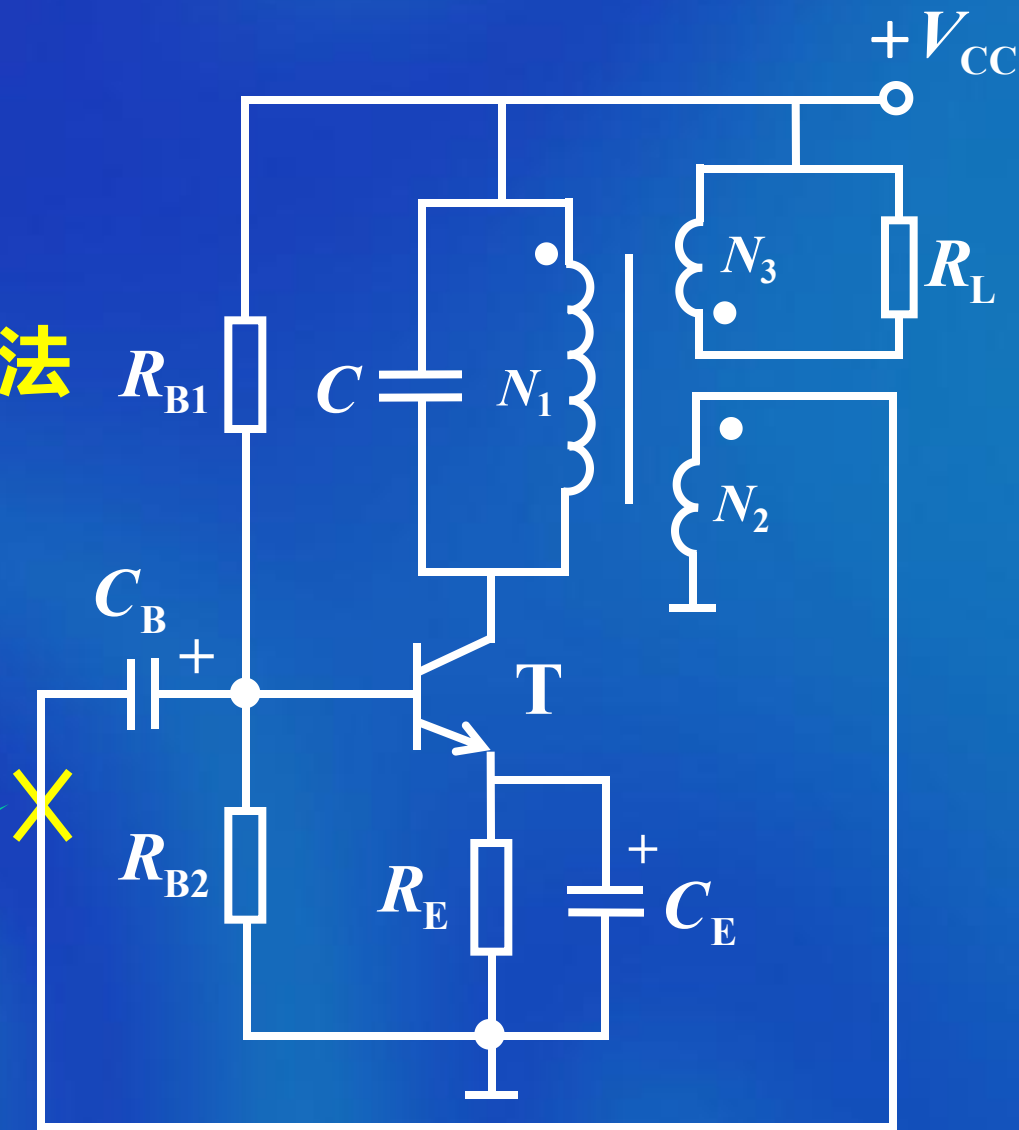
## 正反馈的判断

判断的方法——**瞬时极性法**

判断的步骤

a. 假设谐振回路  
发生谐振

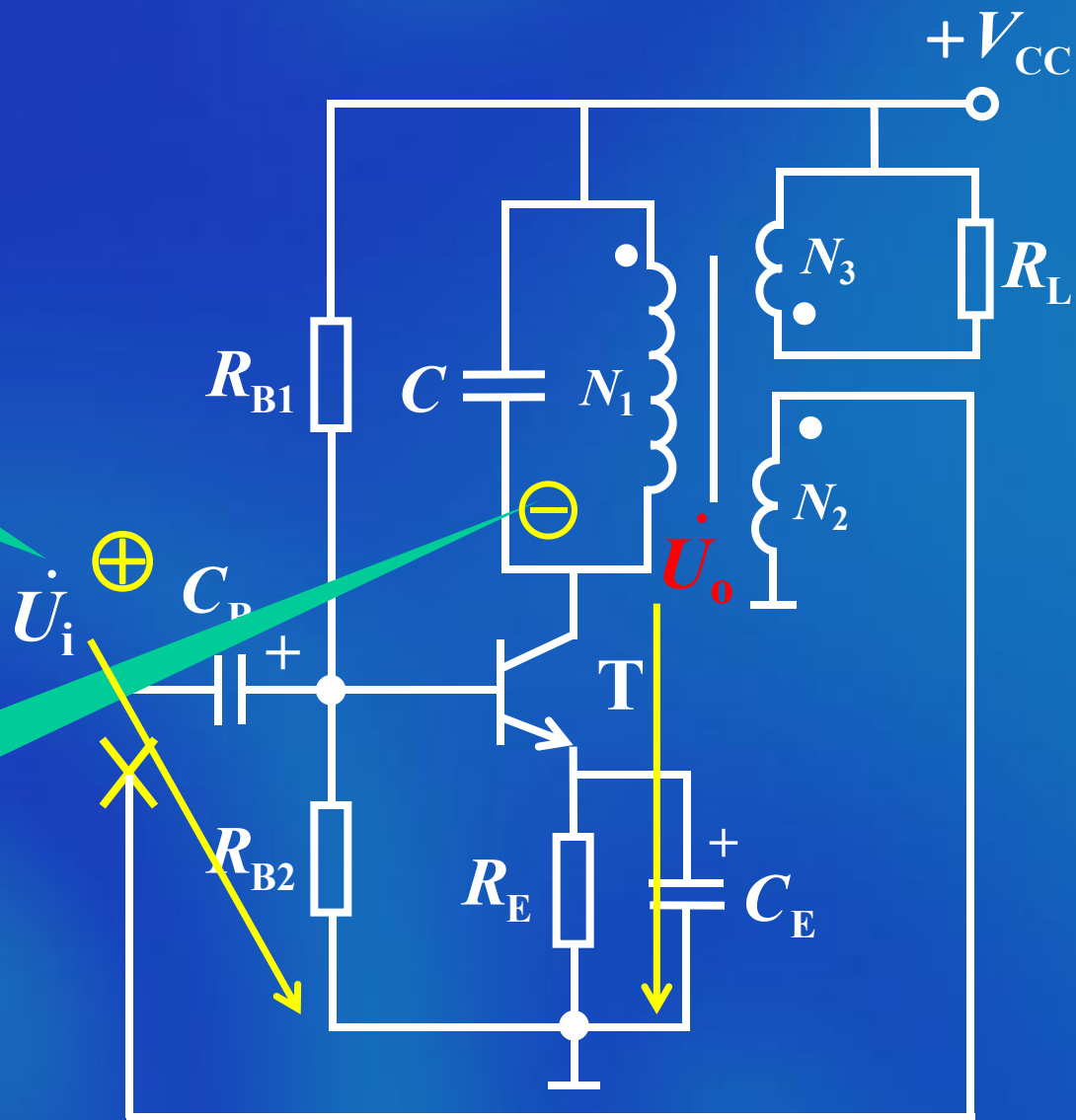
b. 断开反馈回路



c. 加入瞬时极性  
为 $\oplus$ 输入电压 $\dot{U}_i$

d. 输出电压 $\dot{U}_o$   
极性为 $\ominus$

$$\varphi_A = \pi$$



e. 反馈电压极性  $U_f$  为  $\oplus$

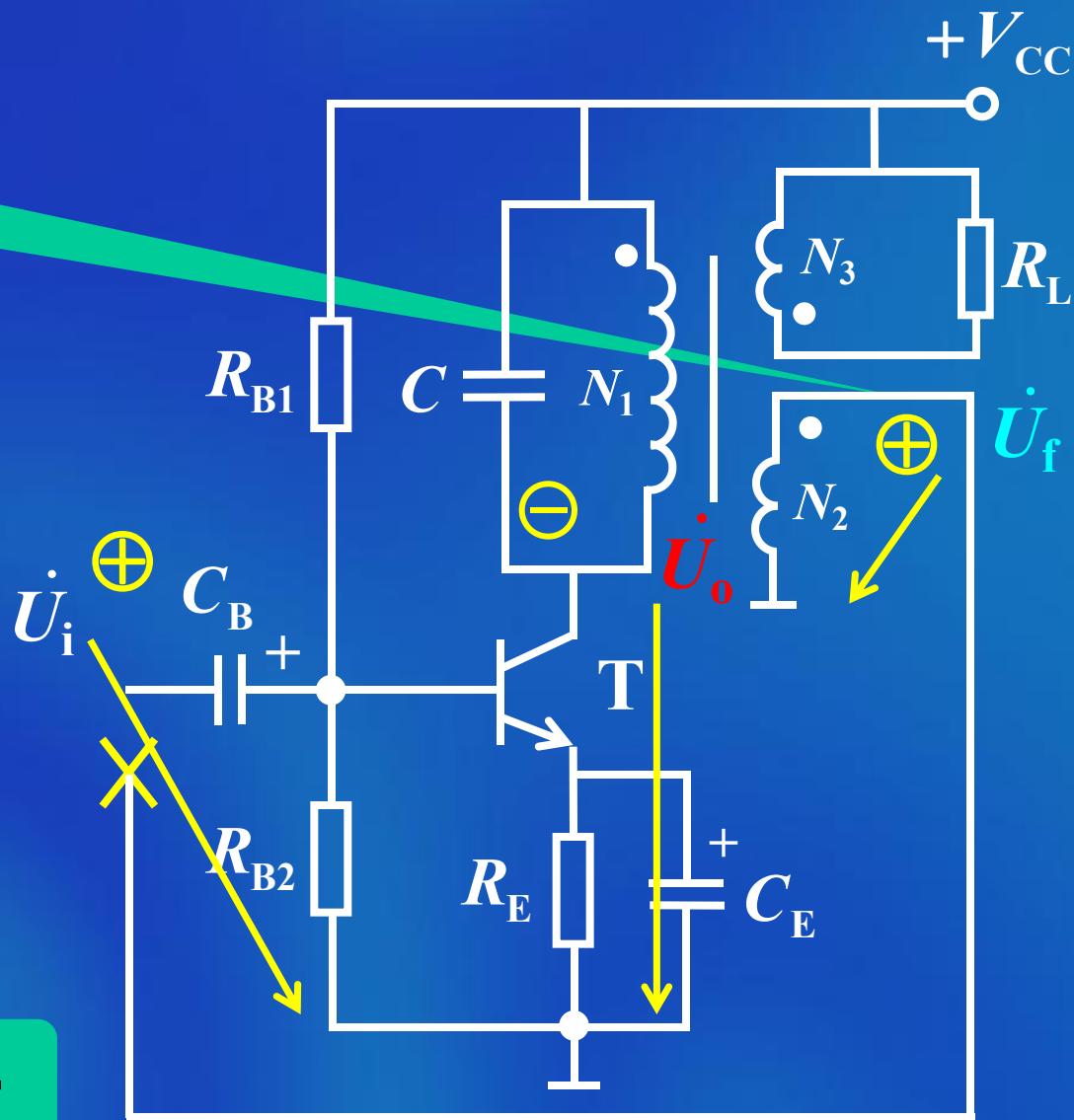
$$\varphi_F = \pi$$

f. 判断是否满足相位平衡条件

$$\varphi_A + \varphi_F = 2\pi$$

构成正反馈

满足相位平衡条件



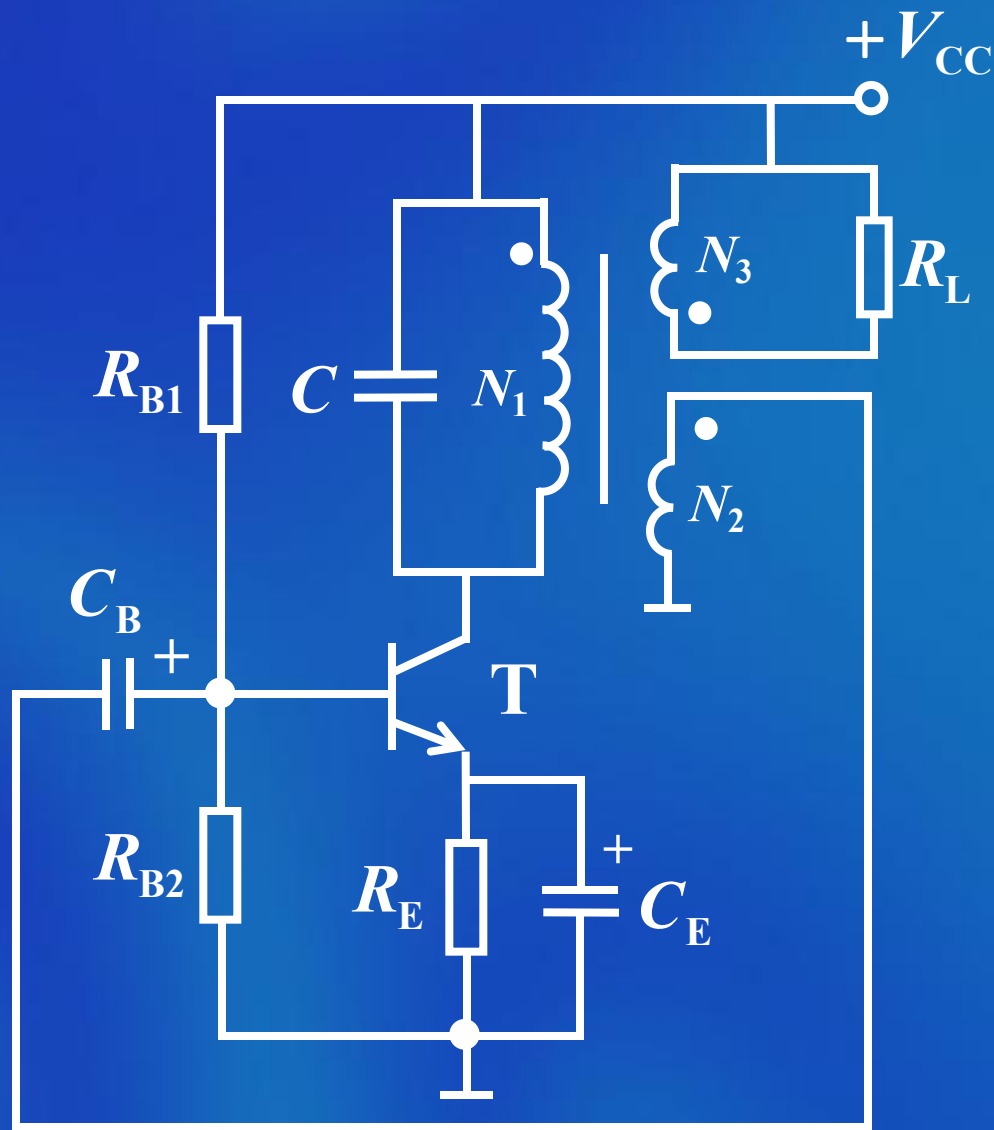
## (2) 起振条件

因为

$$A = \beta \frac{R_C}{r_{be}}$$

$$F = \frac{N_2}{N_1}$$

合理地选择电路参数，及变压器的变比，可使  $AF > 1$ ，满足起振条件。

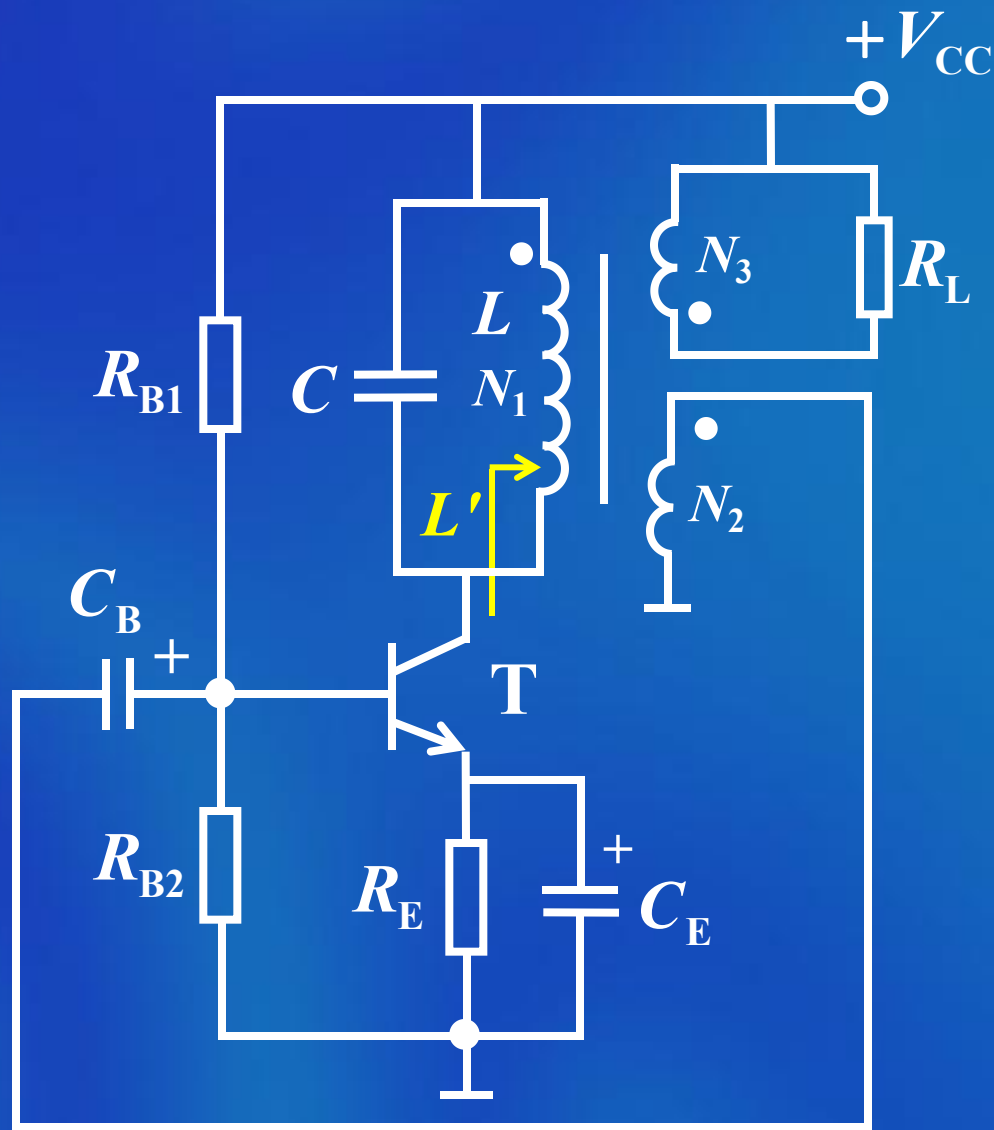


### (3) 振荡频率

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

### (4) 电路的特点

a. 调节 $N_2$ 方便，起振容易。



b. 振荡频率高

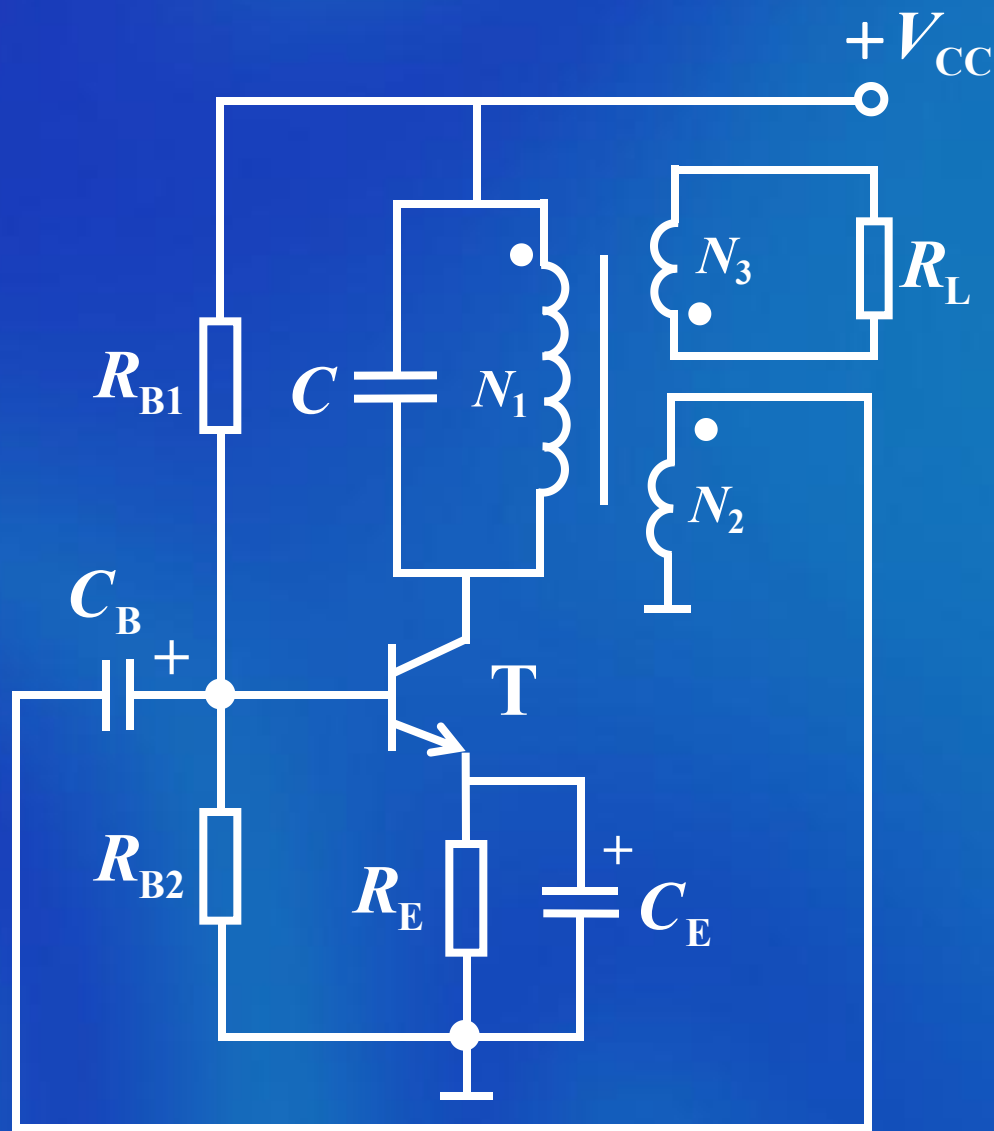
c. 电路的品质因数高

d. 输出波形好

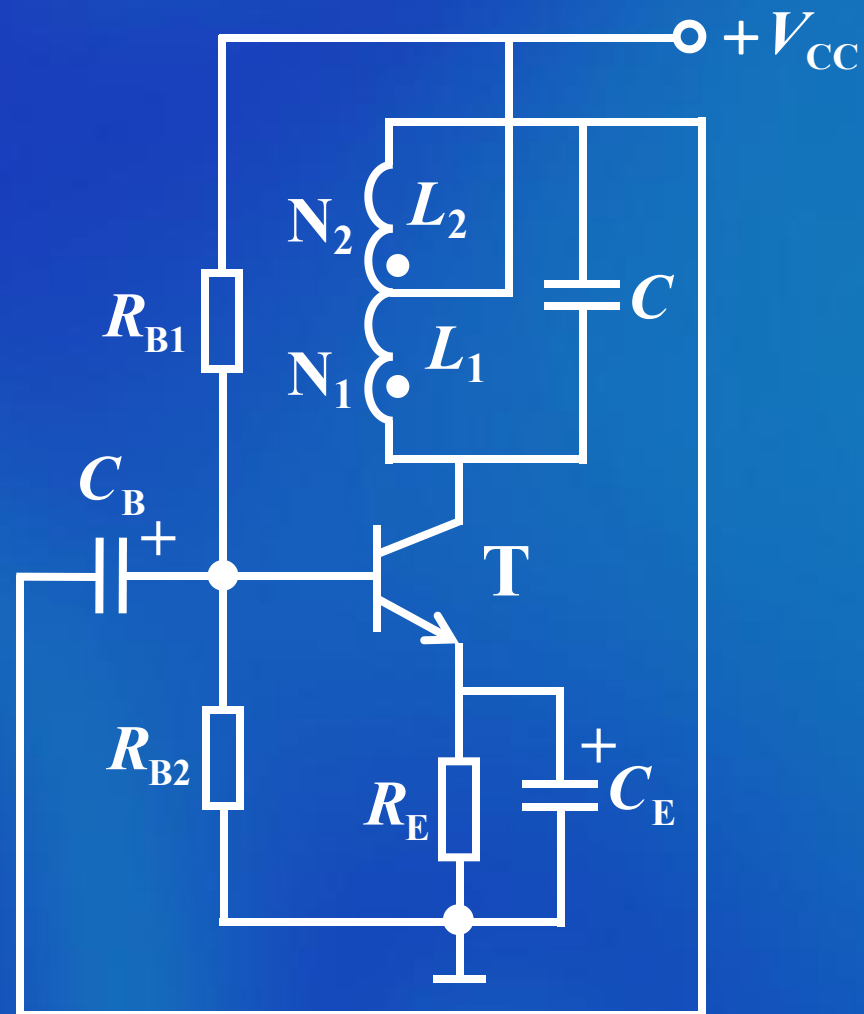
e. 频率稳定性高

f. 体积、重量大

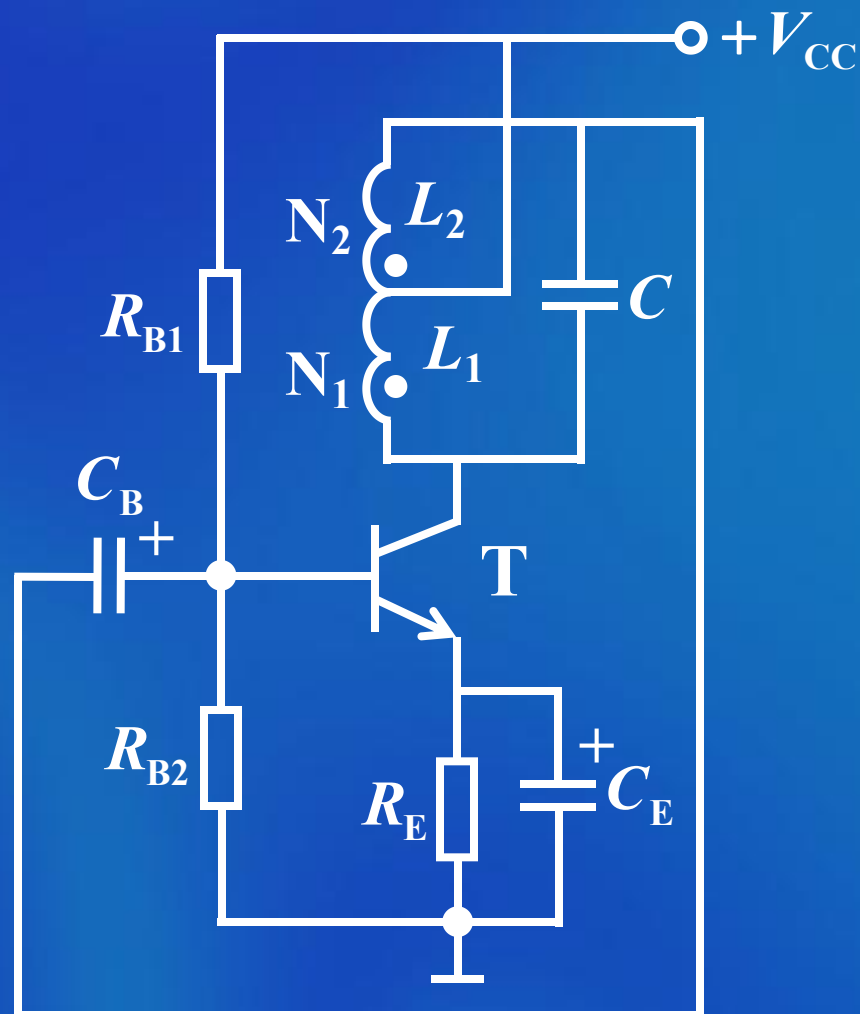
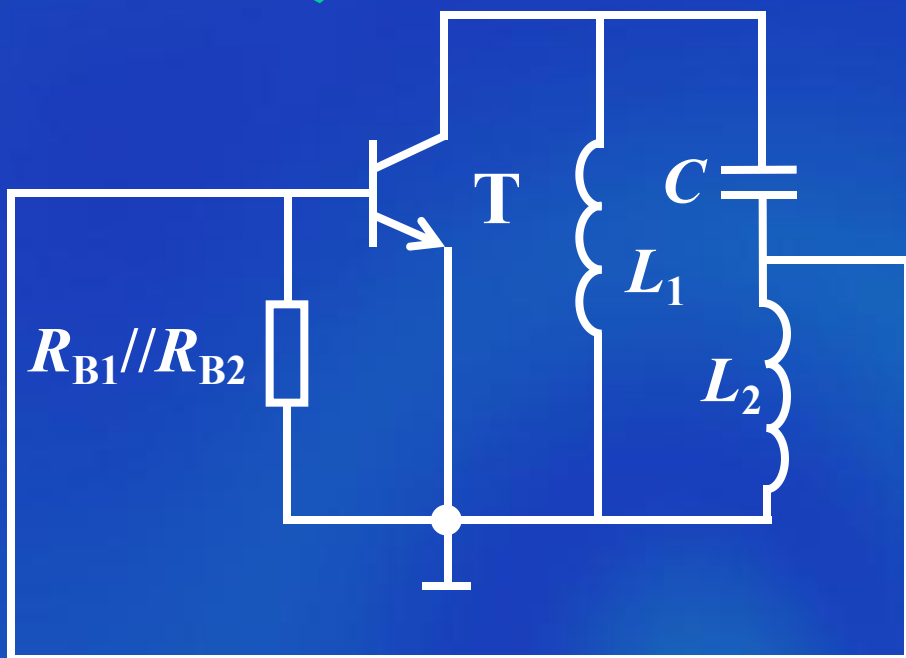
g. 受变压器分布参数的限制，振荡频率不能很高。



## 4. 电感三点式正弦振荡电路

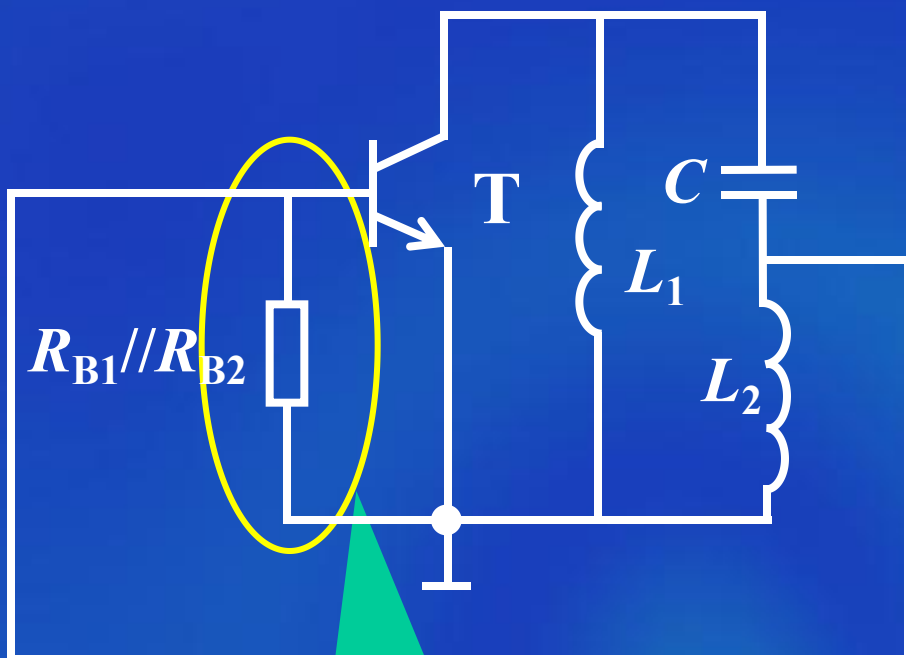


## 振荡电路的交流通路

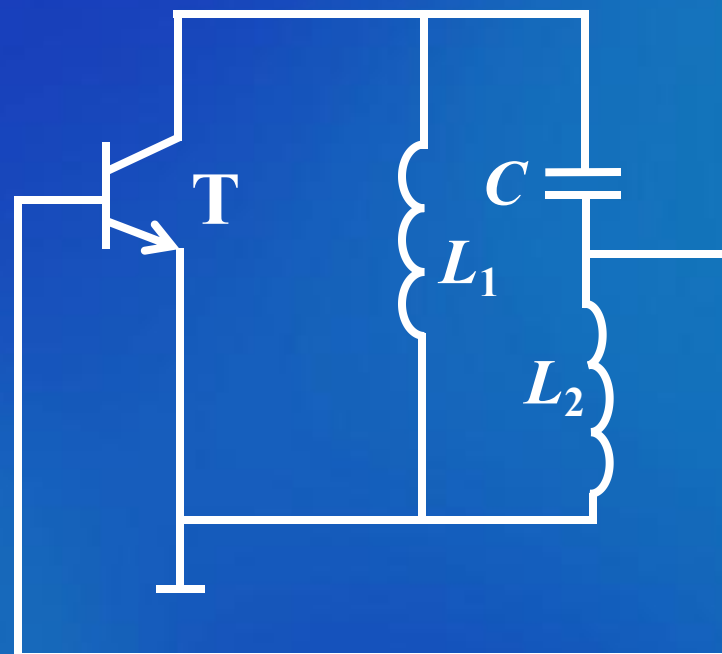




## 简化的交流通路



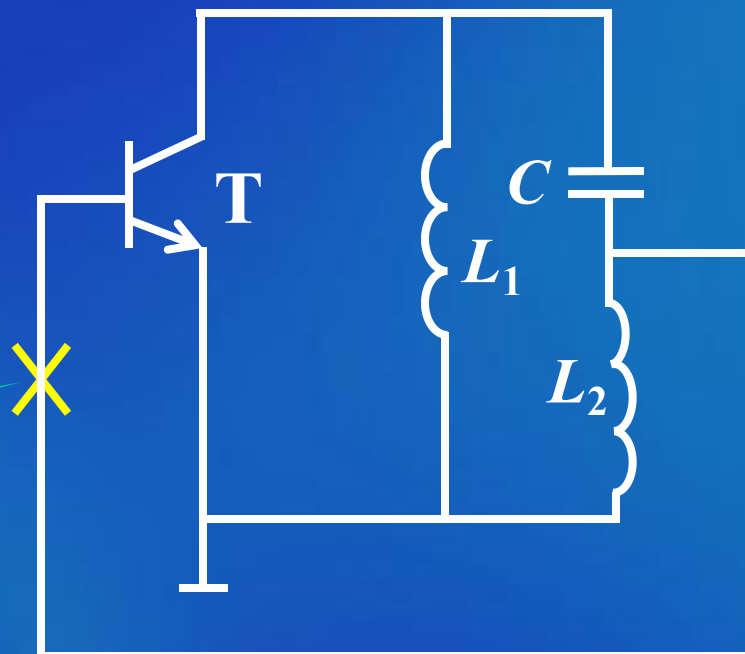
忽略  $R_{B1} // R_{B2}$



## (1) 相位平衡条件的判断

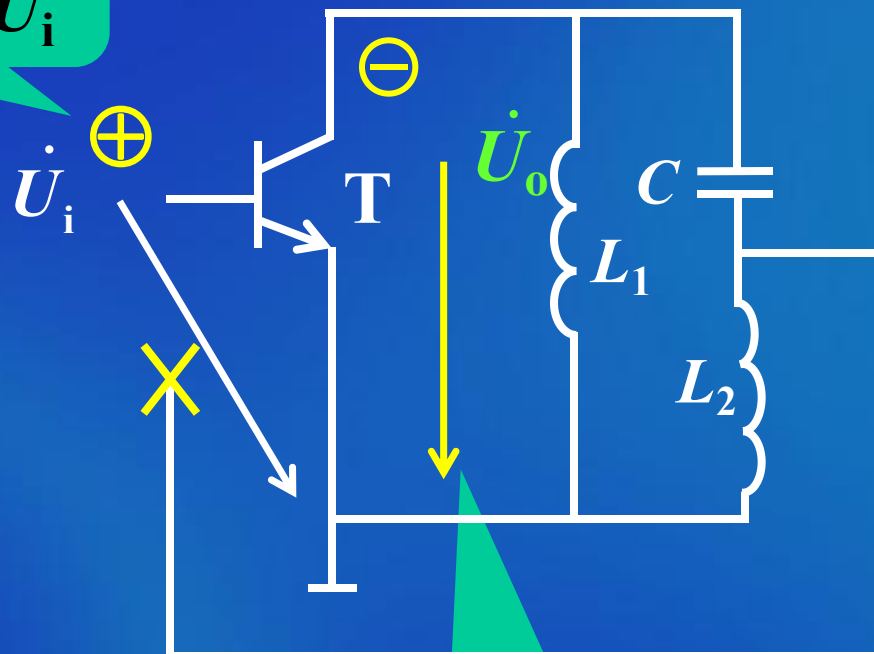
a. 假设谐振回路  
发生谐振

b. 断开反馈回路



c. 加入瞬时极性为 $\oplus$ 输入电压 $\dot{U}_i$

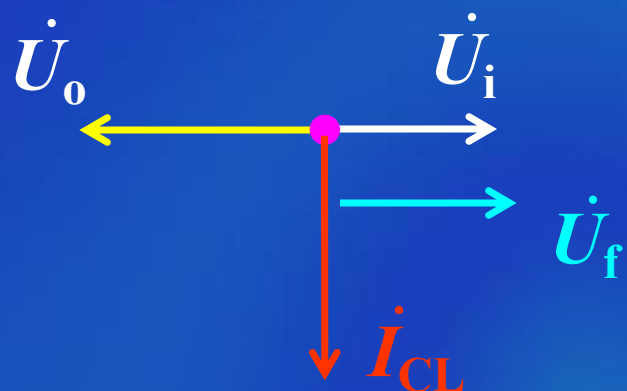
相量图



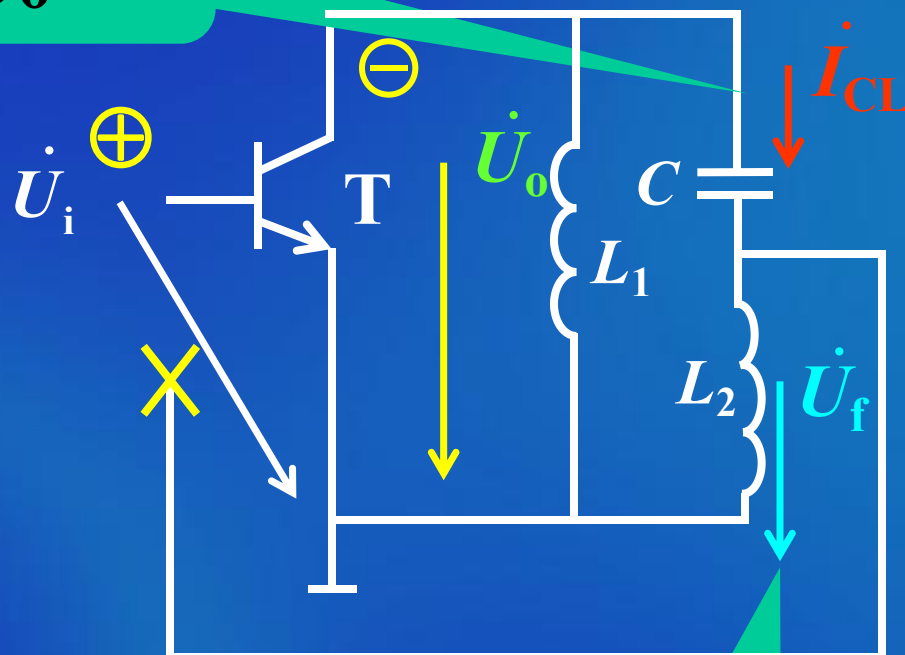
d. 输出电压 $\dot{U}_o$ 极性为 $\ominus$

e. 电流  $\dot{I}_{CL}$  超前  $\dot{U}_o$   $90^\circ$

相量图

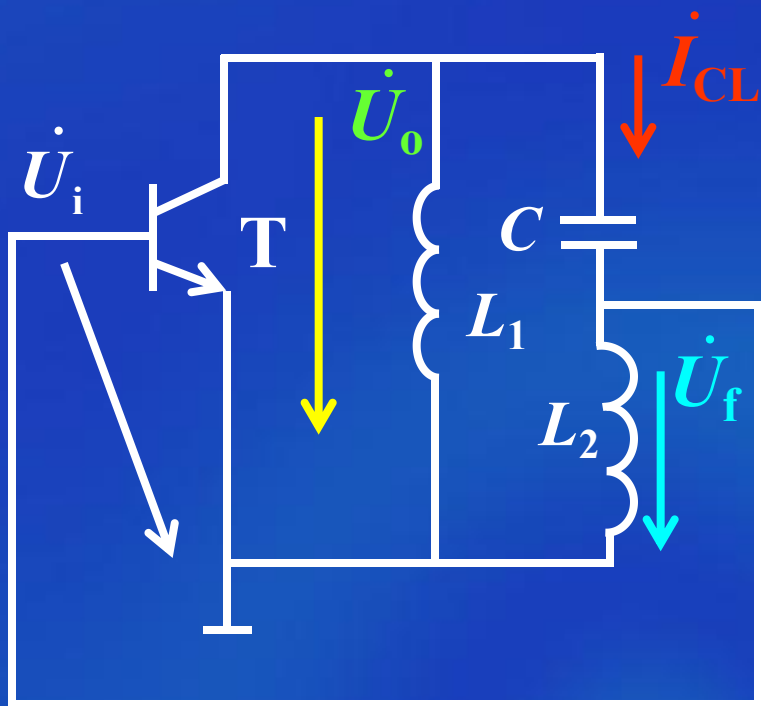


$\dot{U}_f$  与  $\dot{U}_i$  同相, 满足相位平衡条件



f. 电压  $\dot{U}_f$  超前  $\dot{I}_{CL}$   $90^\circ$

## (2) 幅度条件



$\dot{U}_f$ 来自 $L_2$ , 改变电感中间抽头位置, 调整反馈强弱, 容易满足幅度条件。

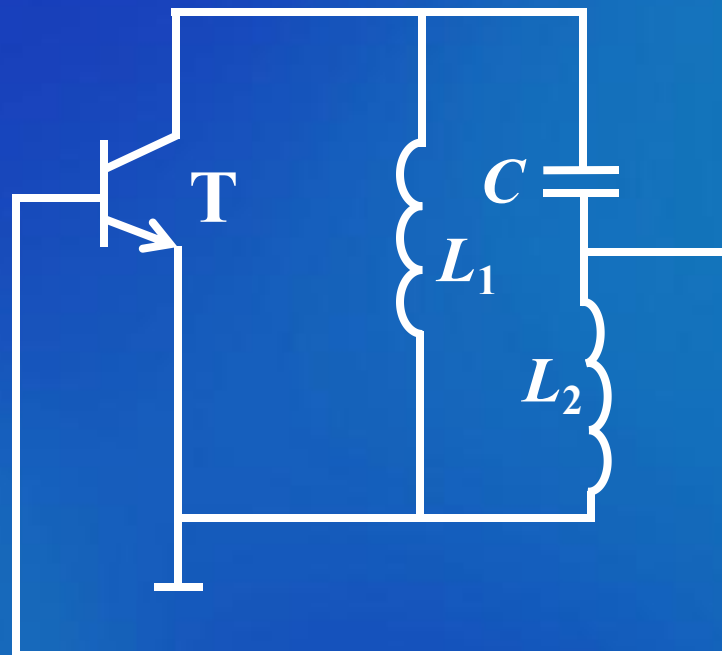
### (3) 谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中

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

$M$ 为线圈 $L_1$ 与 $L_2$ 之间的互感



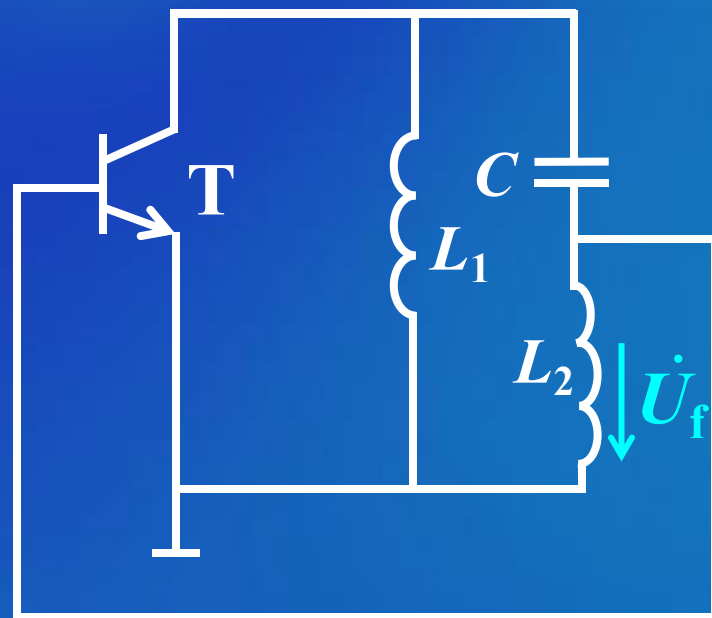
#### (4) 电路特点

a. 线圈的三个端子分别与T的三个电极B、C、E相连接，故称之为电感三点式振荡电路。

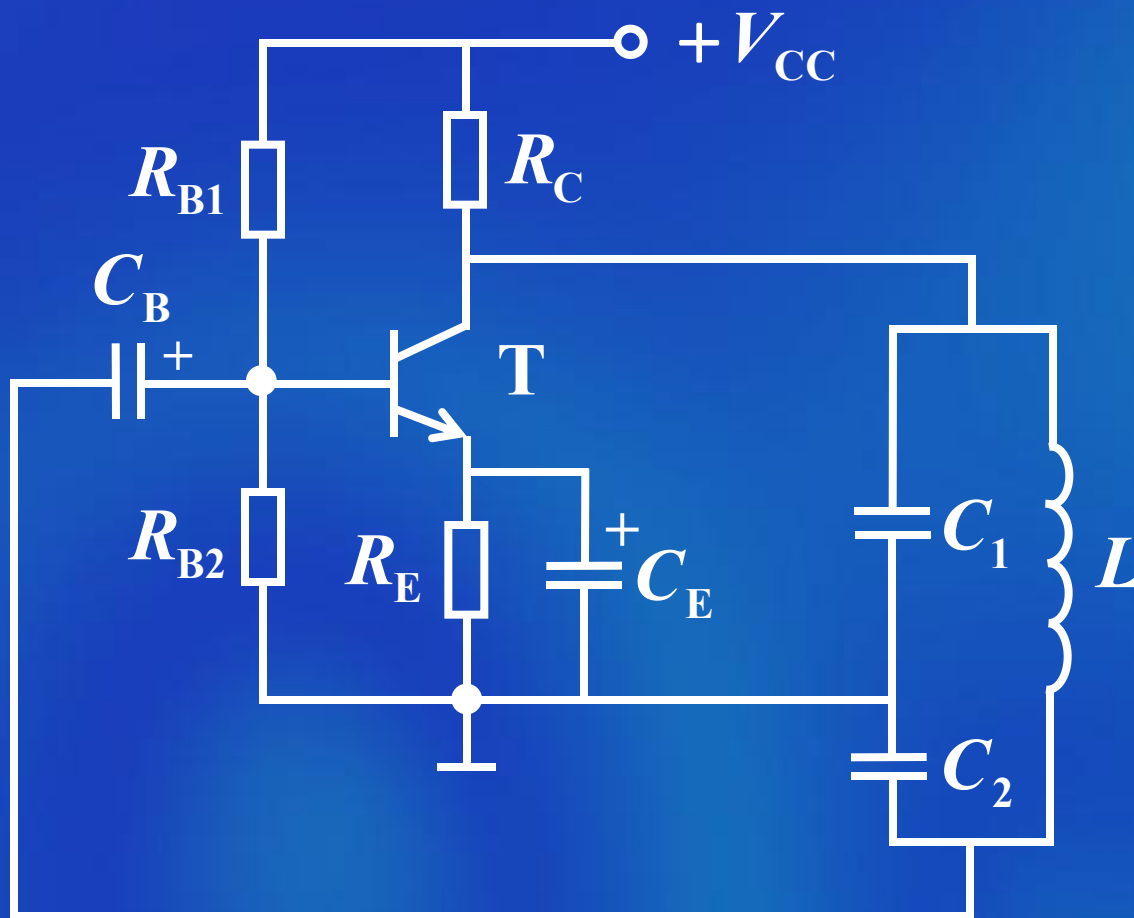
b. 容易起振。

c. 采用可变电容器可以调节振荡频率，适用于收音机和信号发生器等需要经常改变输出频率的场合。

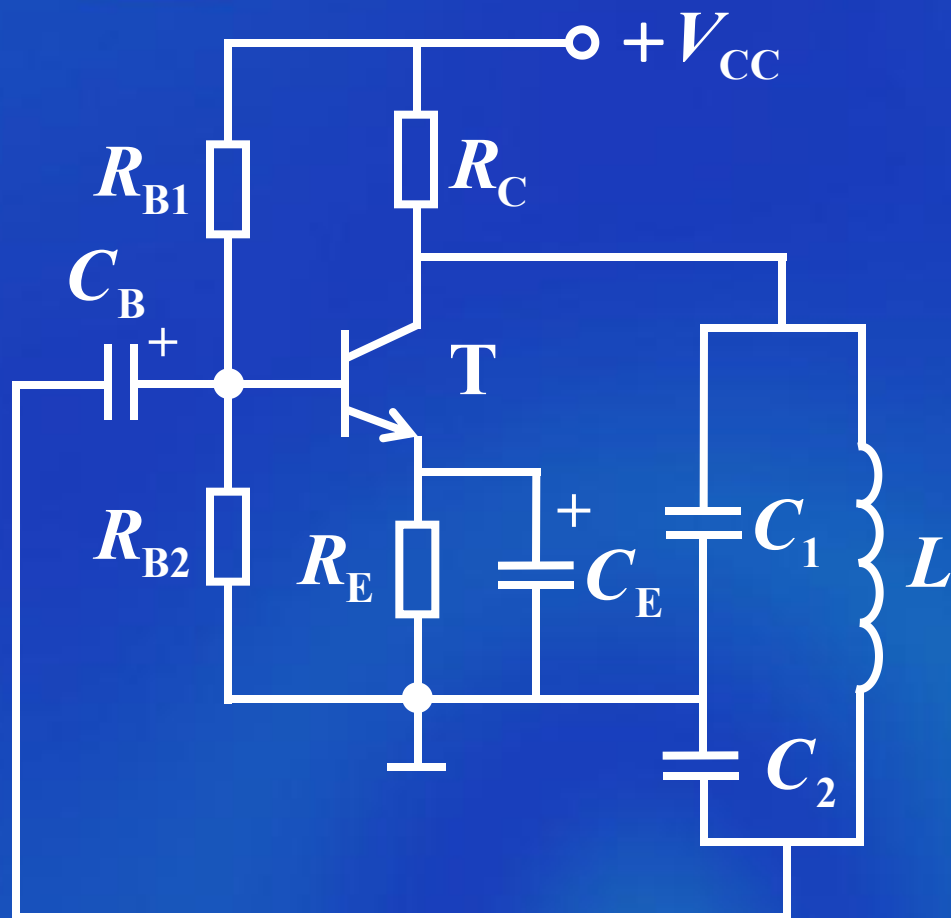
d. 输出波形中含有高次谐波，波形较差。



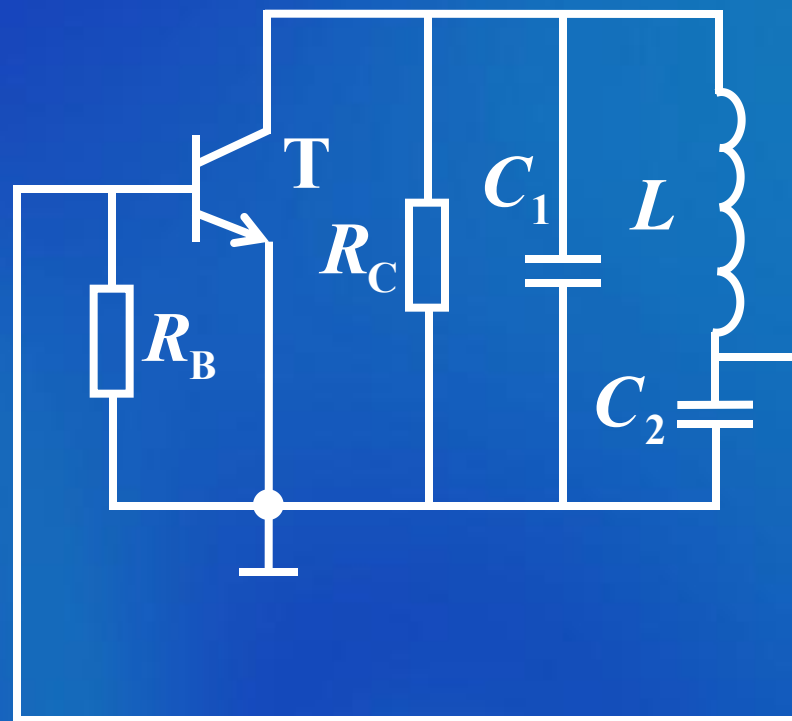
## (5) 电容三点式正弦波振荡电路





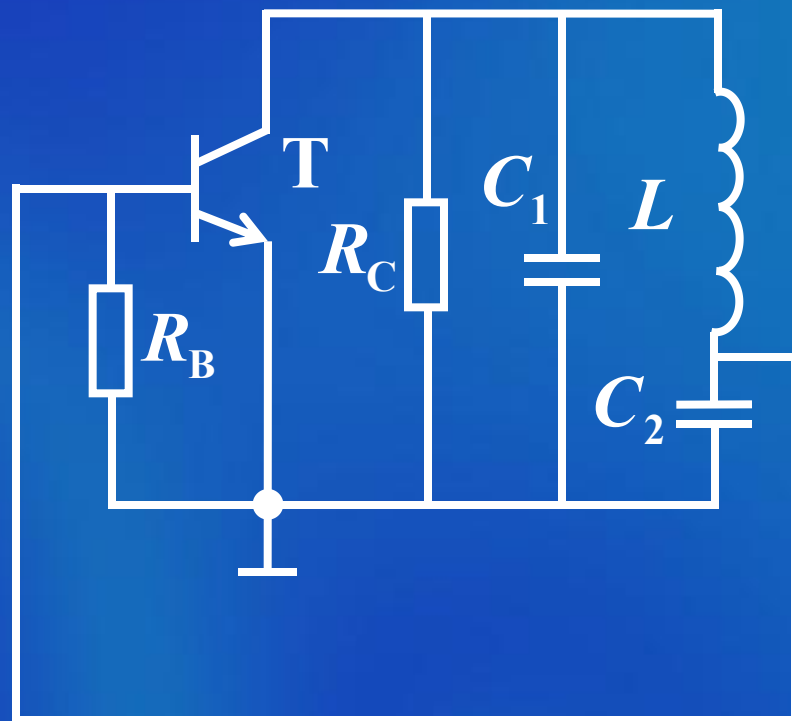
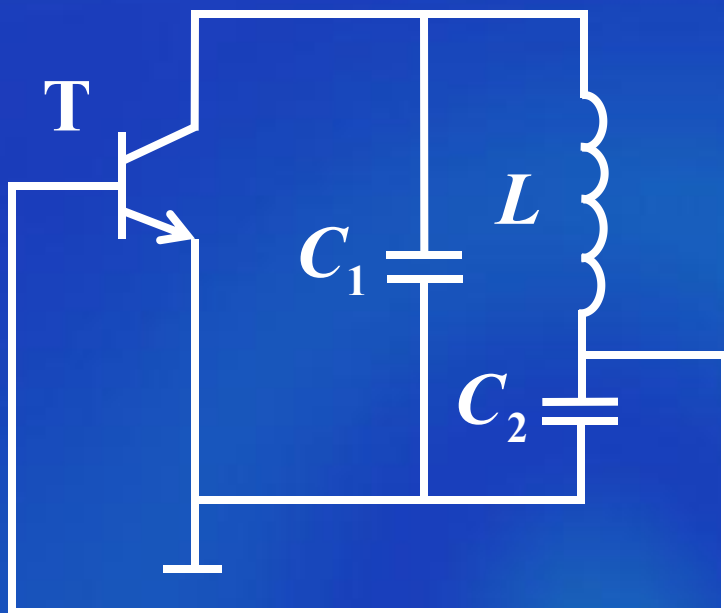


## 交流通路



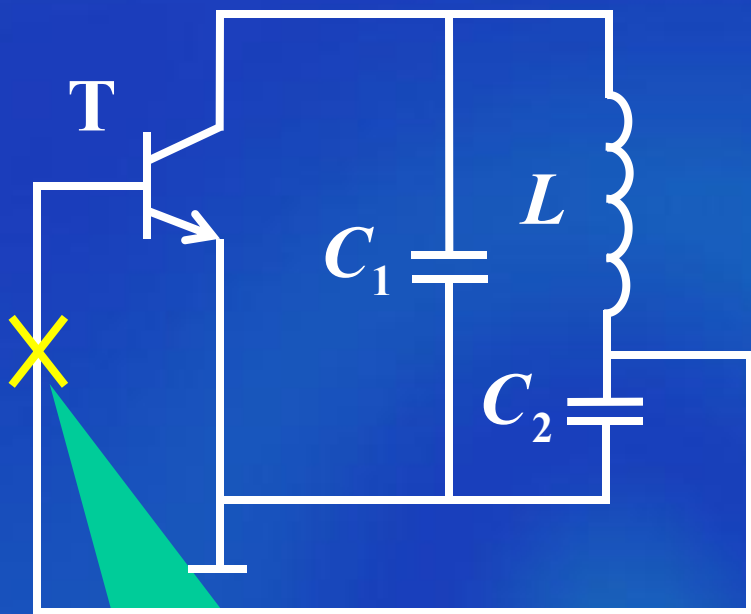
$$R_B = R_{B1} // R_{B2}$$

## 简化的交流通路



## (1) 相位平衡条件的判断

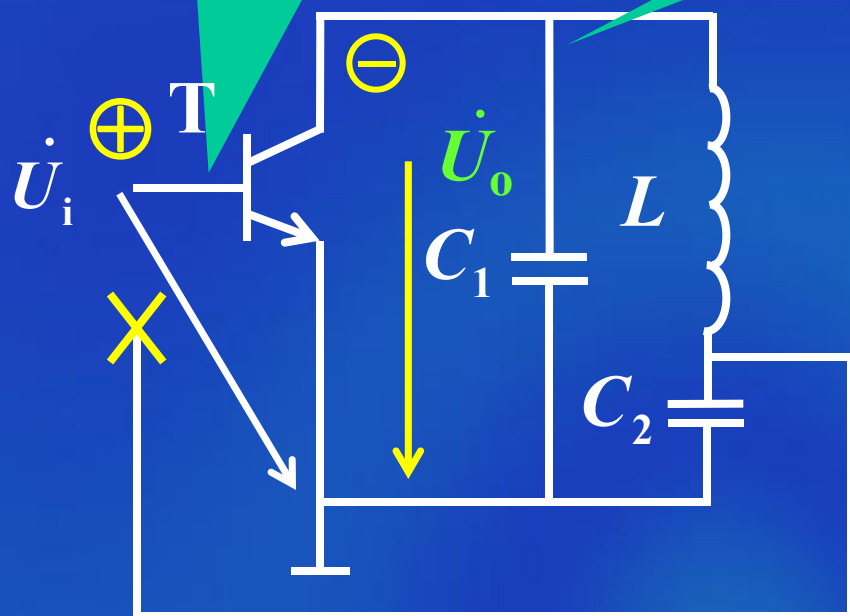
a. 假设谐振回路  
发生谐振



b. 断开反馈回路

c. 加入瞬时极性为 $\oplus$ 输入电压 $\dot{U}_i$

d. 输出电压 $\dot{U}_o$ 极性为 $\ominus$



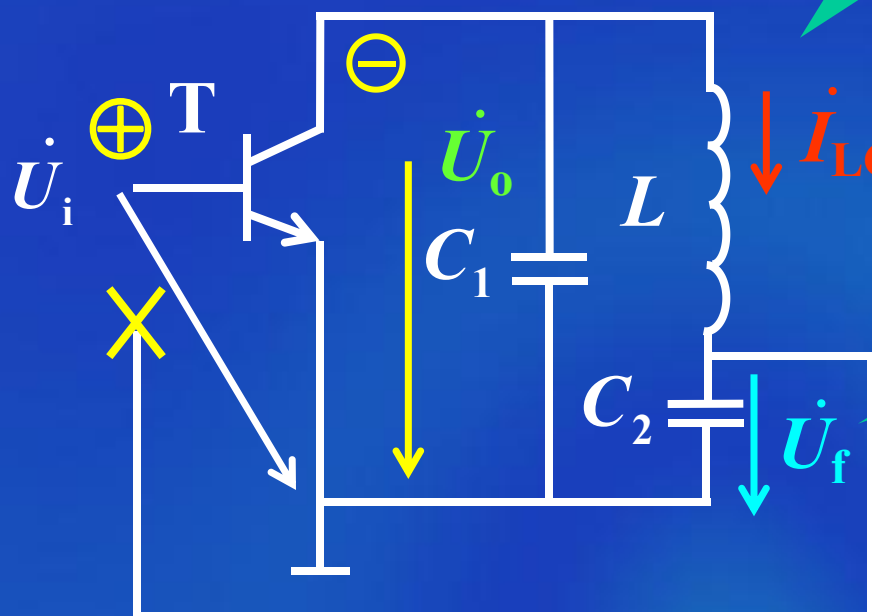
相量图



e. 电流  $\dot{I}_{LC}$  滞后  $\dot{U}_o$   $90^\circ$

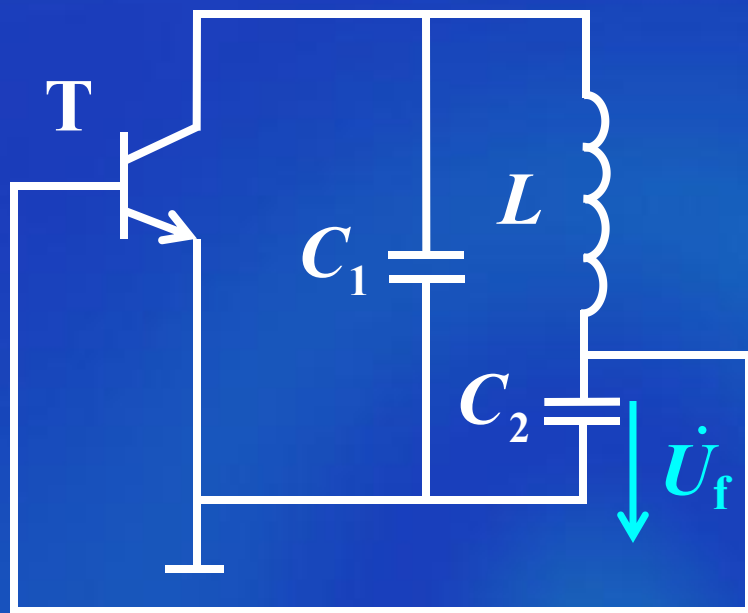
f. 电压  $\dot{U}_f$  滞后  $\dot{I}_{CL}$   $90^\circ$

相量图



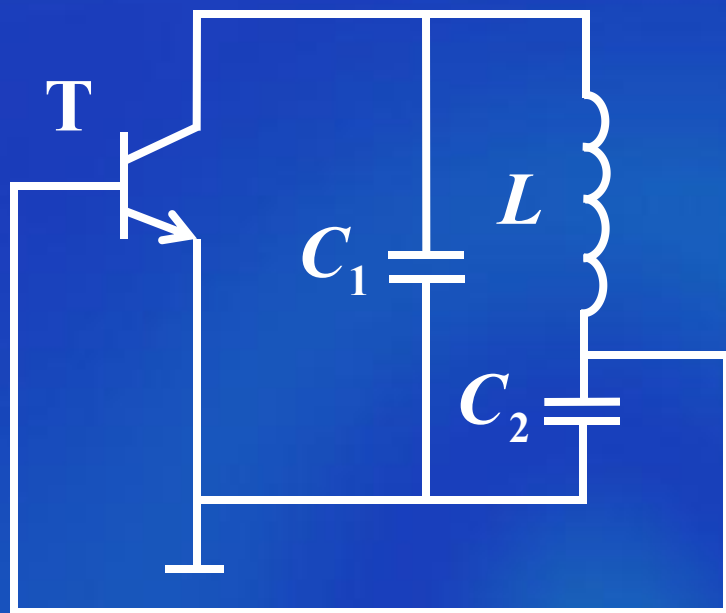
$\dot{U}_f$  与  $\dot{U}_i$  同相，满足相位平衡条件

## (2) 幅度条件



$\dot{U}_f$ 来自 $C_2$ ，改变 $C_2$ 的大小，调整反馈强弱，容易满足幅度条件。

### (3) 谐振频率



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

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

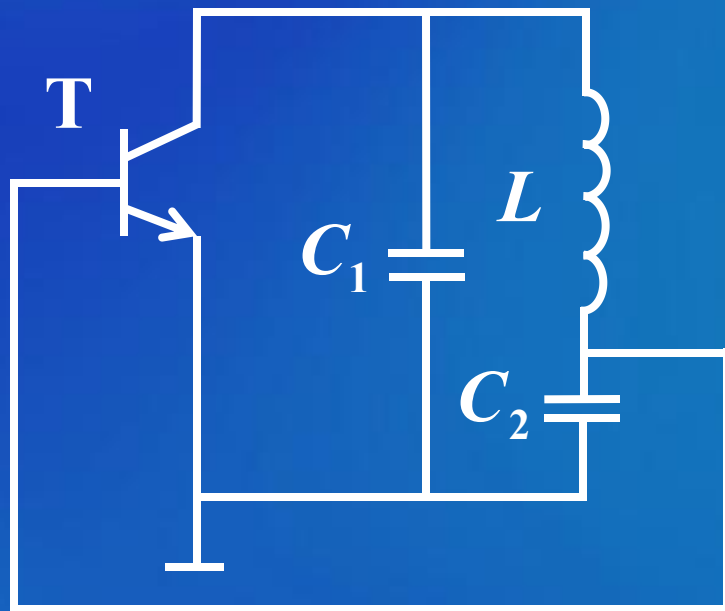
## (4) 电路特点

a. 电容器的三个端子分别与T的三个电极相连接，故称之为电容三点式振荡电路。

b. 容易起振。

c. 输出波形中高次谐波少，波形好。

d. 改变电容 $C_2$ 时，容易停振。





# 改进的电容三点式振荡电路

## 谐振频率

目的：消除温度等因素的影响，提高  $f$  的稳定度。

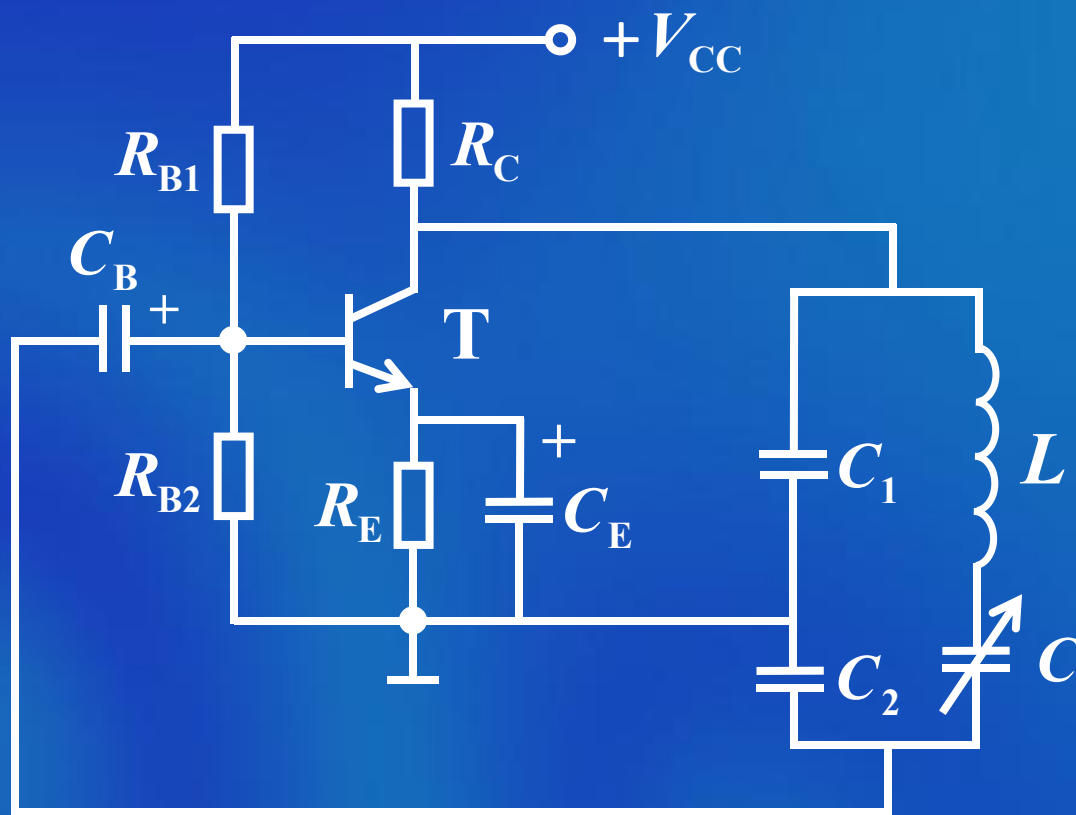
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}}$$

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C}$$

## 选择参数

$$C_1 \gg C \quad C_2 \gg C$$

故 
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



## 正弦波信号发生器的工作原理



## 正弦波振荡器判断振荡与否的分析步骤:

- 1) 放大电路结构是否合理, 能正常放大且工作点合适;
- 2) 电路是否满足相位条件, 只有正反馈才可能振荡;
- 3) 电路是否满足幅度条件, 检测 $AF$ 的大小。

若  $AF < 1$  则电路减幅振荡, 最后停止振荡。

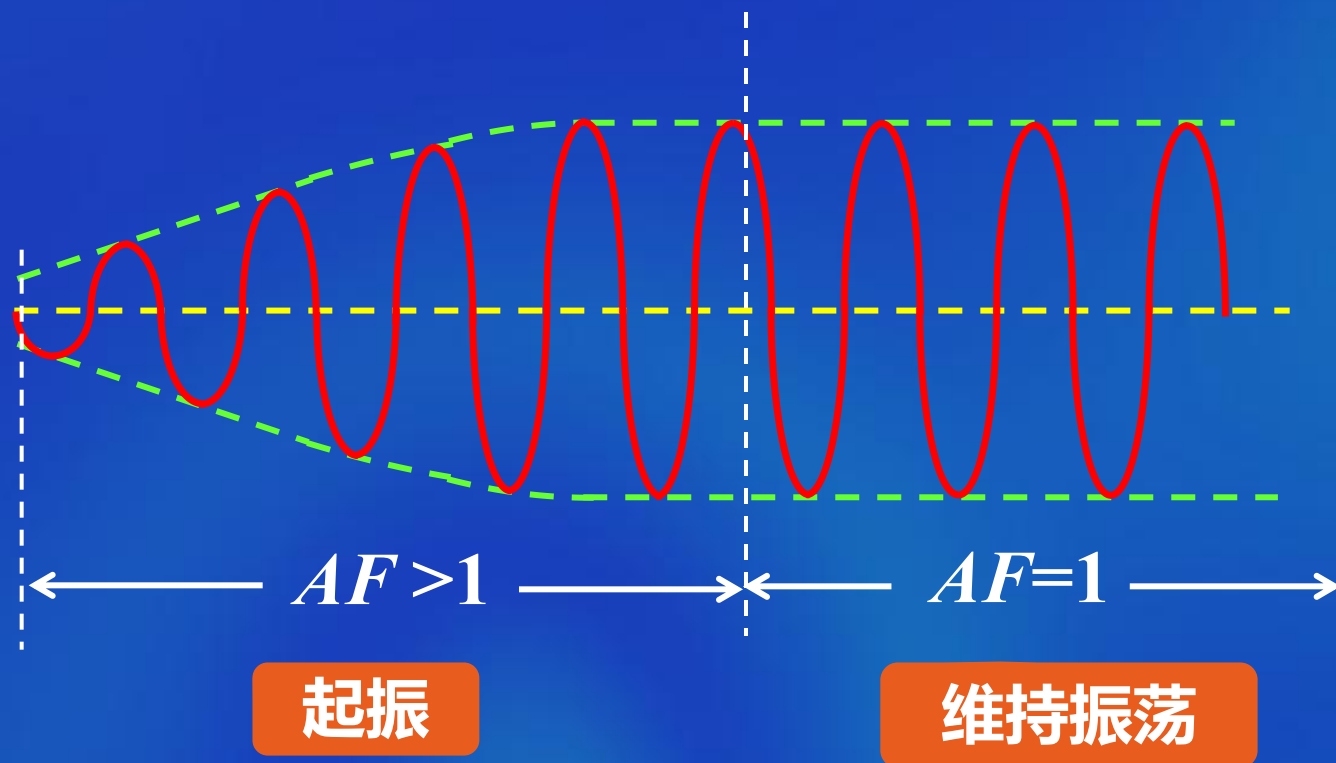
若  $AF > 1$ , 电路增幅振荡, 但会出现非线性失真。

若  $AF = 1$ , 电路等幅振荡。

$$AF \geq 1$$

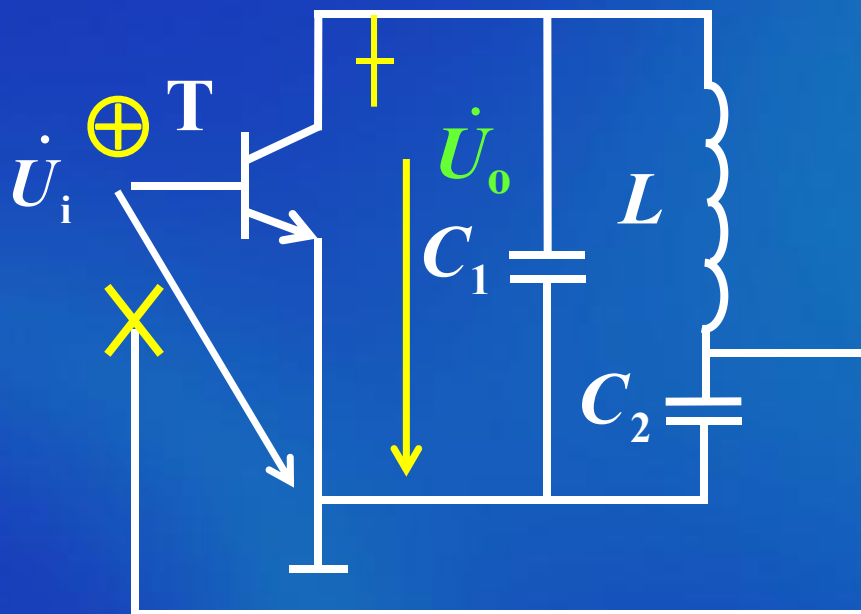
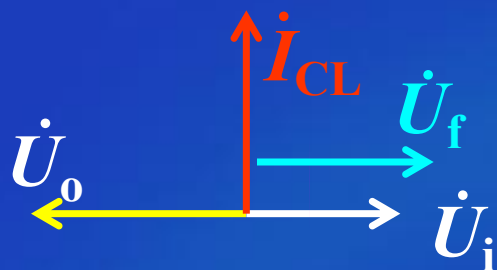
电路要有稳幅环节

## 自激振荡电路的建立过程



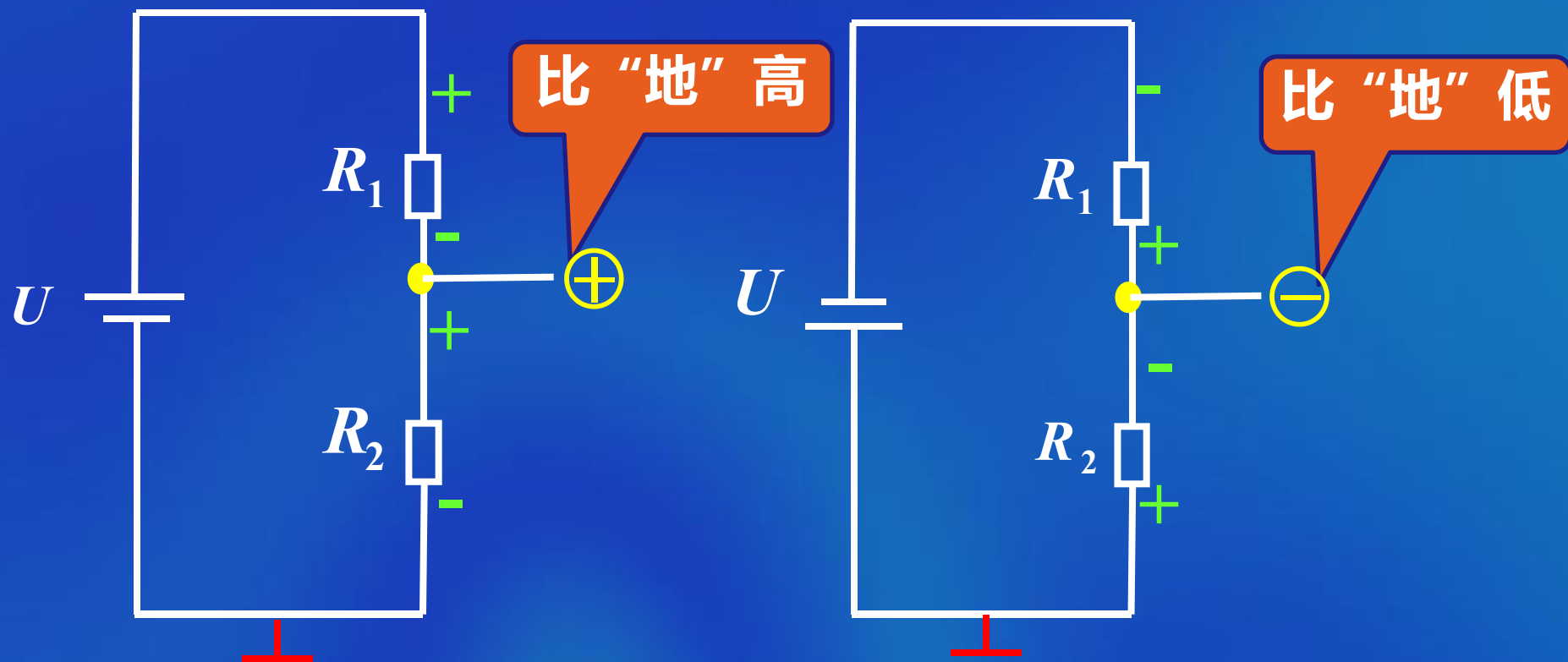
# 正弦波振荡器判断振荡是否存在的方法：

## 相量图



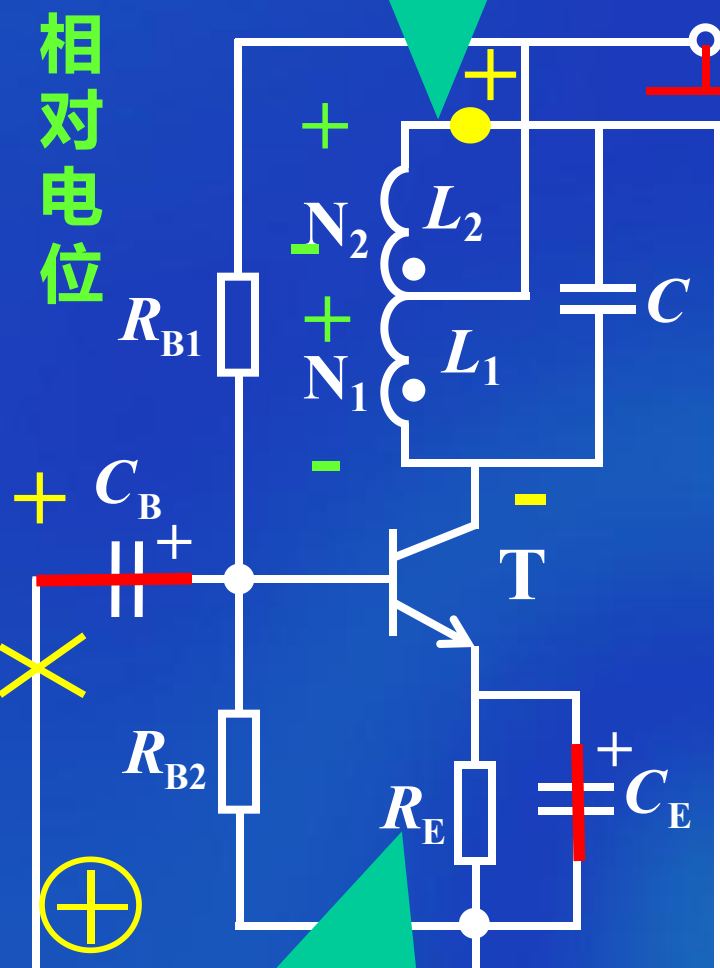
其它判别法-----

相对电位判断法



比“地”高

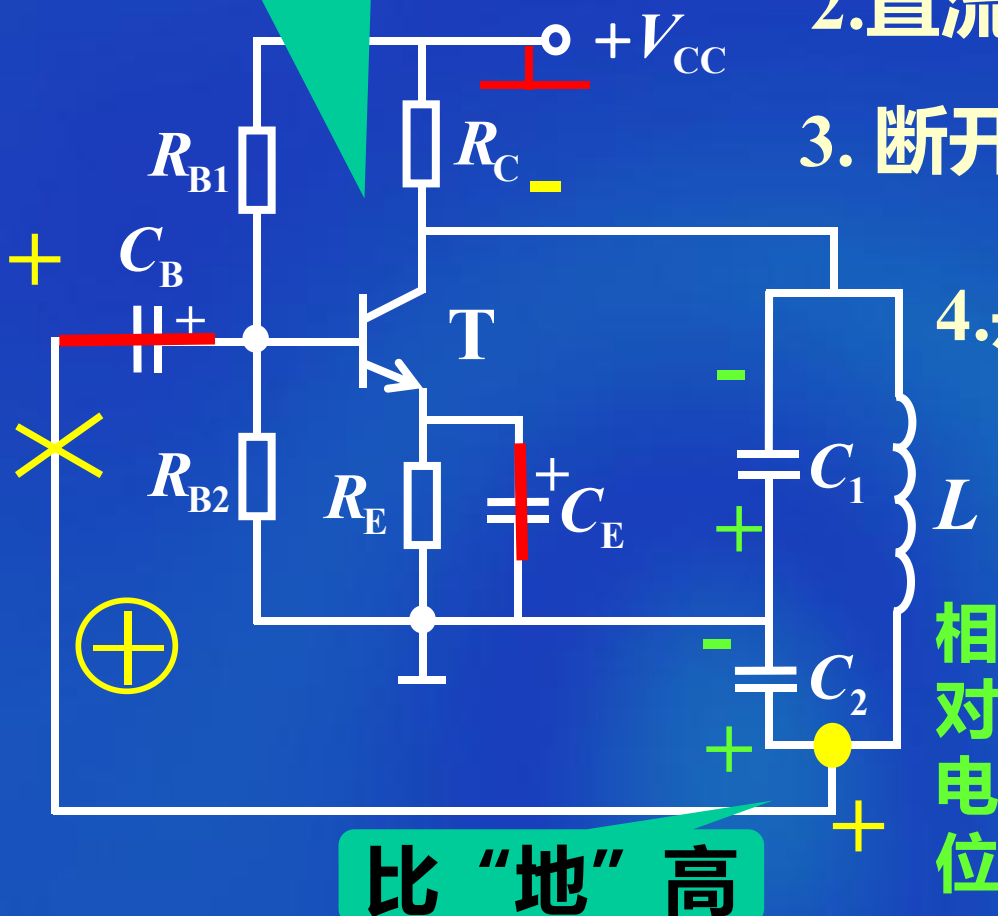
# 其它判别法



- 1.短接大电容----交流信号在大电容上无压降
- 2.直流电源交流接地
3. 断开反馈判极性---瞬时极性法
- 4.是否是正反馈？---并联反馈  
 是--- 有可能 振荡  
 否--- 不可能 振荡

有可能振荡

有可能振荡



1.短接大电容-----交流信号在大电容上无压降

2.直流电源交流接地

3. 断开反馈判极性---瞬时极性法

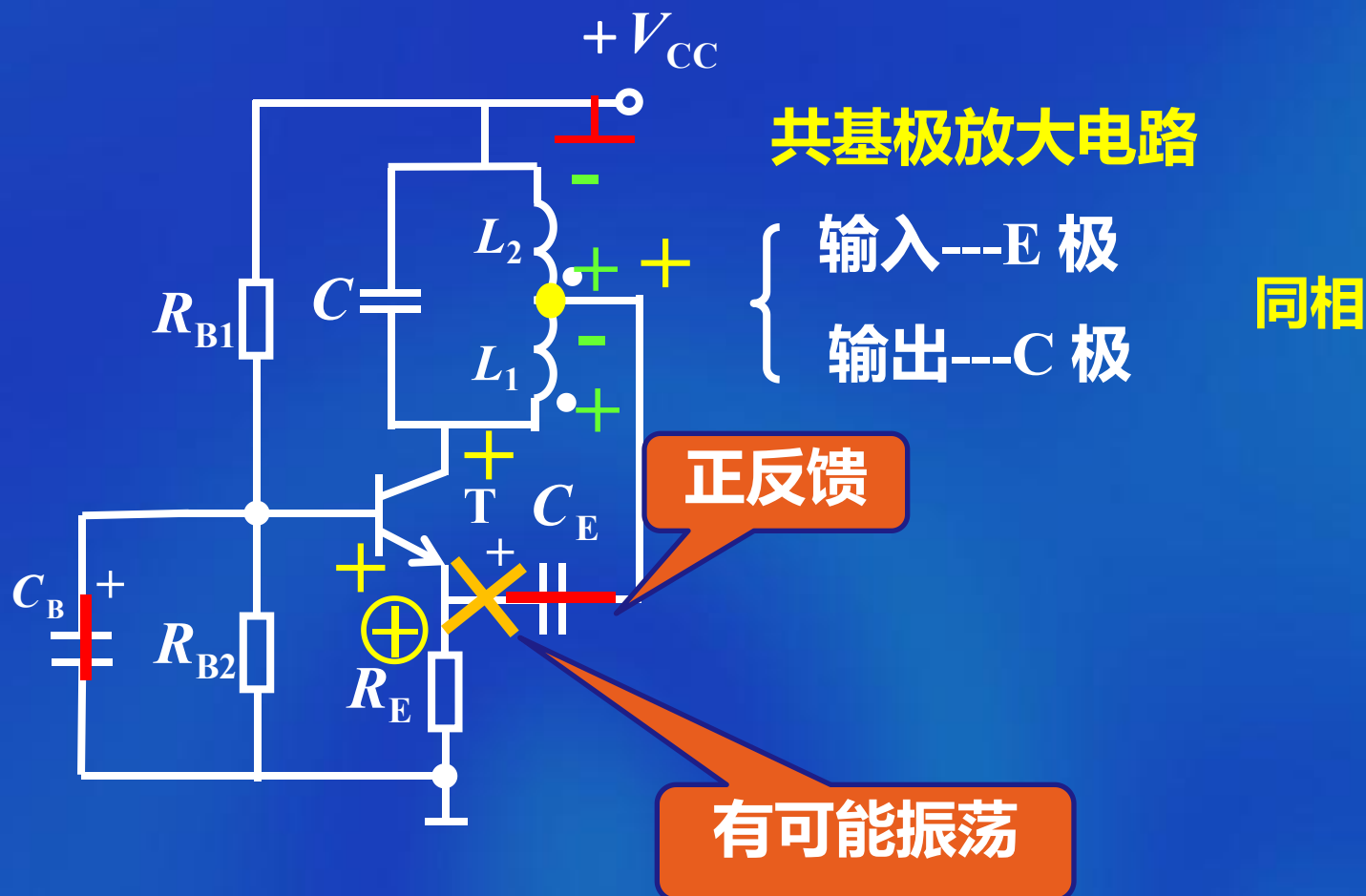
4.是否是正反馈？---并联反馈

是--- 有可能 振荡

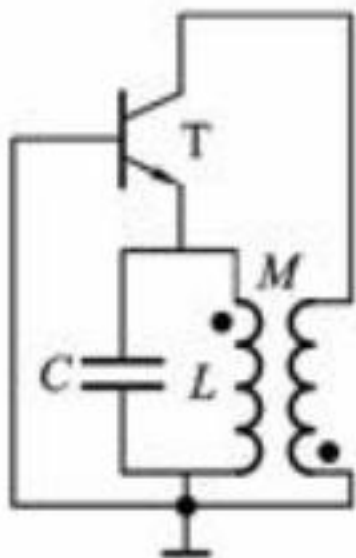
否--- 不可能 振荡



# 例题：

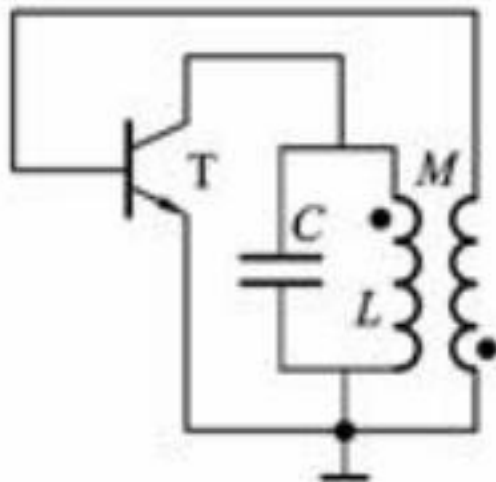


**三版P328 9.11** 电路如题98图所示，图中各个电路都只画出了交流通路，试从相位平衡的观点，说明其中哪些电路有可能产生自激振荡？若不可能产生振荡，请加以改正。



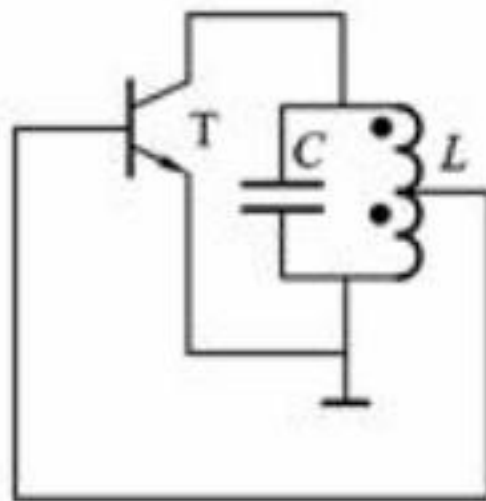
共基极

(a)



共射极

(b)



共射极

(c)

题9.11图