

# 第4章 (1) 正弦波发生电路

**4.1 产生正弦振荡的条件**

**4.2 RC正弦波振荡器**

**4.3 LC 正弦波振荡器**

**1 变压器反馈式振荡器**

**2 三点式振荡器**

**4.4 石英晶体振荡器**

## ❖ 闭环增益

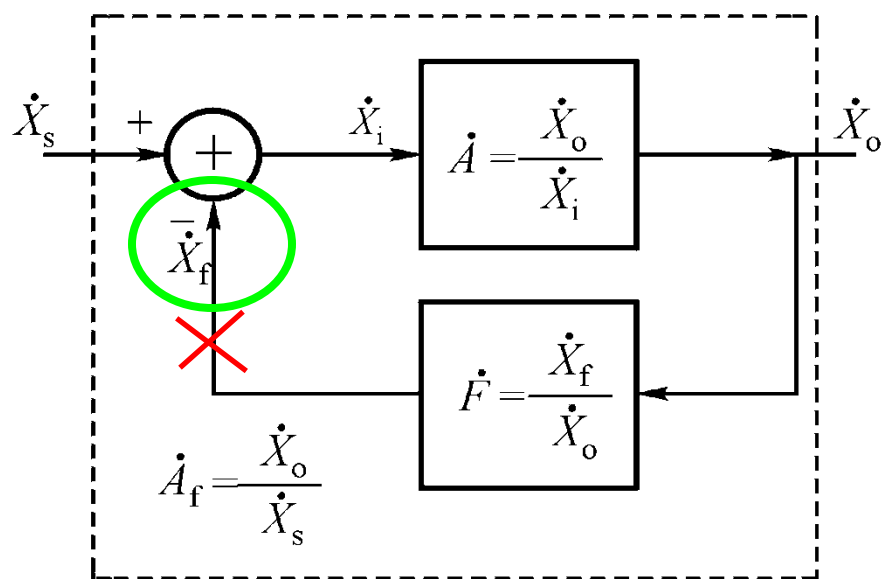
➤ 放大器开环:  $\dot{X}_o = \dot{A}\dot{X}_i = \dot{A}\dot{X}_s$

➤ 放大器闭环:  $\dot{X}_f = \dot{F}\dot{X}_o$

$$\dot{X}_i = \dot{X}_s - \dot{X}_f = \dot{X}_s - \dot{F}\dot{A}\dot{X}_i$$

$$\dot{A}_{f-} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s} = \frac{\dot{A}\dot{X}_i}{(1 + \dot{F}\dot{A})\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

$$\dot{A}_{f+} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s} = \frac{\dot{A}\dot{X}_i}{(1 - \dot{F}\dot{A})\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 - \dot{A}\dot{F}}$$



负反馈

正反馈

$$\dot{X}_i = \dot{X}_s - \dot{F}\dot{A}\dot{X}_i$$

反馈信号取代输入信号

自激振荡

负反馈还是正反馈与电路结构和反馈环路有关

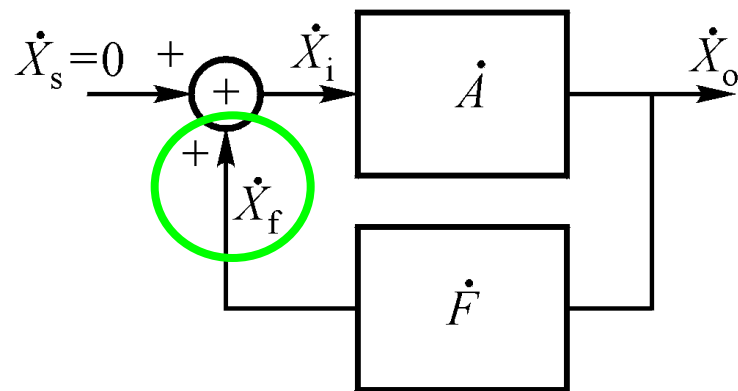
自激振荡与这里的正反馈振荡原理上没有本质区别

## 4.1 产生正弦振荡的条件

**正弦振荡器**：无外加信号，输出一定频率一定幅值的信号。  
与负反馈放大电路振荡的不同之处：在正弦波振荡电路中引入的是正反馈，且振荡频率可控。

✓ 负反馈放大电路在通频带内是负反馈；  
在通带外，因附加相移可能会形成正反馈，从而产生自激振荡。  
这是必须加以克服的。

✓ 在正弦波振荡电路中，  
在通频带内，就要求接成正反馈。  
这是构成正弦振荡电路的首要条件。

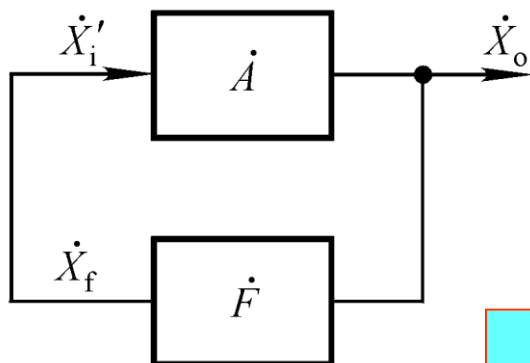


$$\dot{A}_{f+} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_s} = \frac{\dot{A}\dot{X}_i}{(1 - \dot{F}\dot{A})\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 - \dot{A}\dot{F}}$$

$$\dot{X}_i = \dot{X}_s + \dot{X}_f = \dot{F}\dot{A}\dot{X}_i$$

$\mathbf{X_s=0}$ ，自激振荡

# 1. 正弦波振荡的条件



一旦产生稳定的振荡，则电路的输出量自维持，即

$$\dot{X}_i = AF\dot{X}_i$$

$$AF = 1 \Rightarrow \begin{cases} |AF| = 1 \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \end{cases}$$

-----幅值平衡条件

-----相位平衡条件

起振条件：  $|AF| > 1$

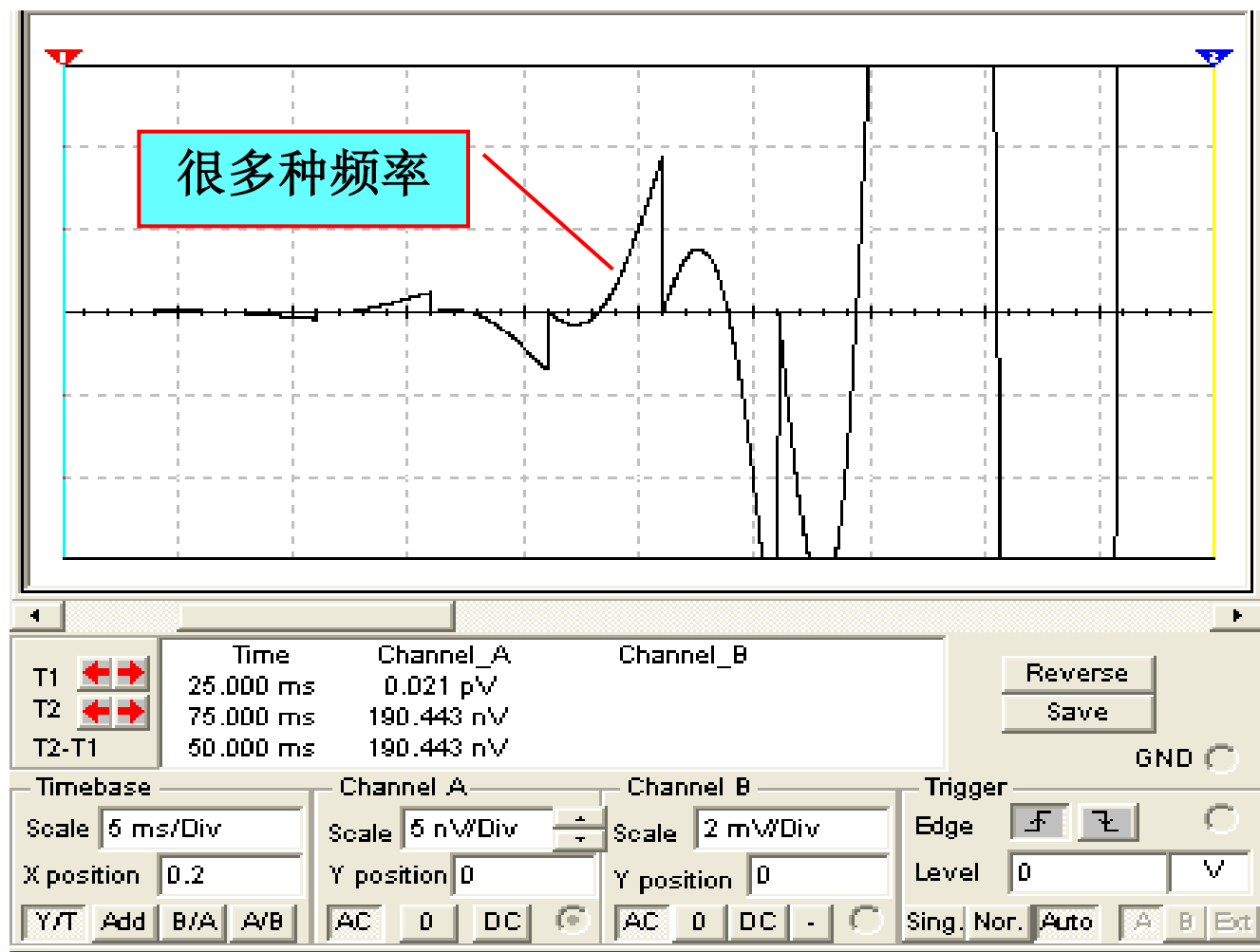
要产生正弦波振荡，必须有满足相位条件的 $f_0$ ，且在合闸通电时对于 $f=f_0$ 信号有从小到大直至稳幅的过程，即满足起振条件。

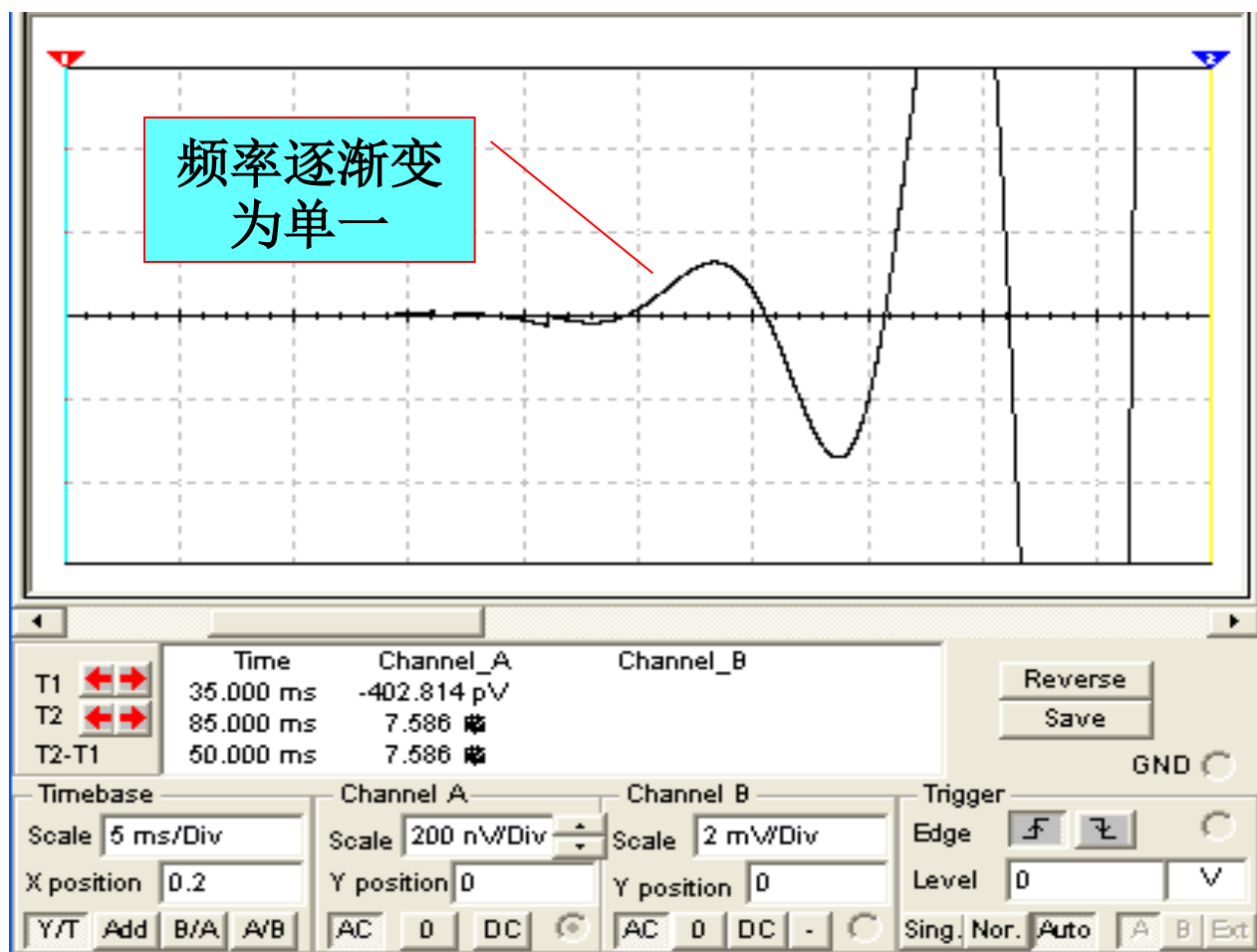
但是稳定的正弦波振荡还应该具备：

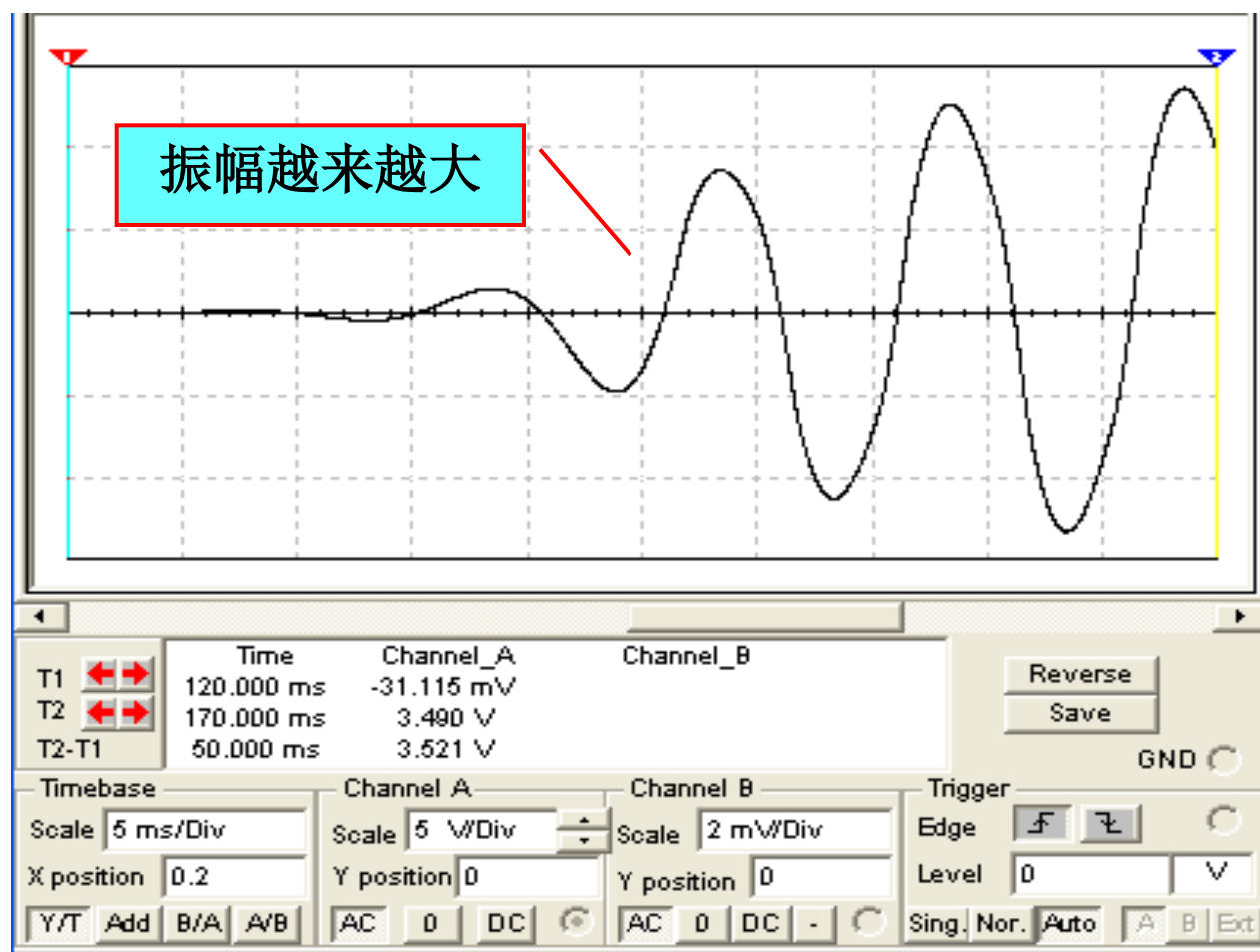
- (1) 单一频率的正弦波——要有**选频网络**；
- (2) 稳定的正弦波（环路增益自动达到1）——**稳幅环节**。

## 2. 起振与稳幅

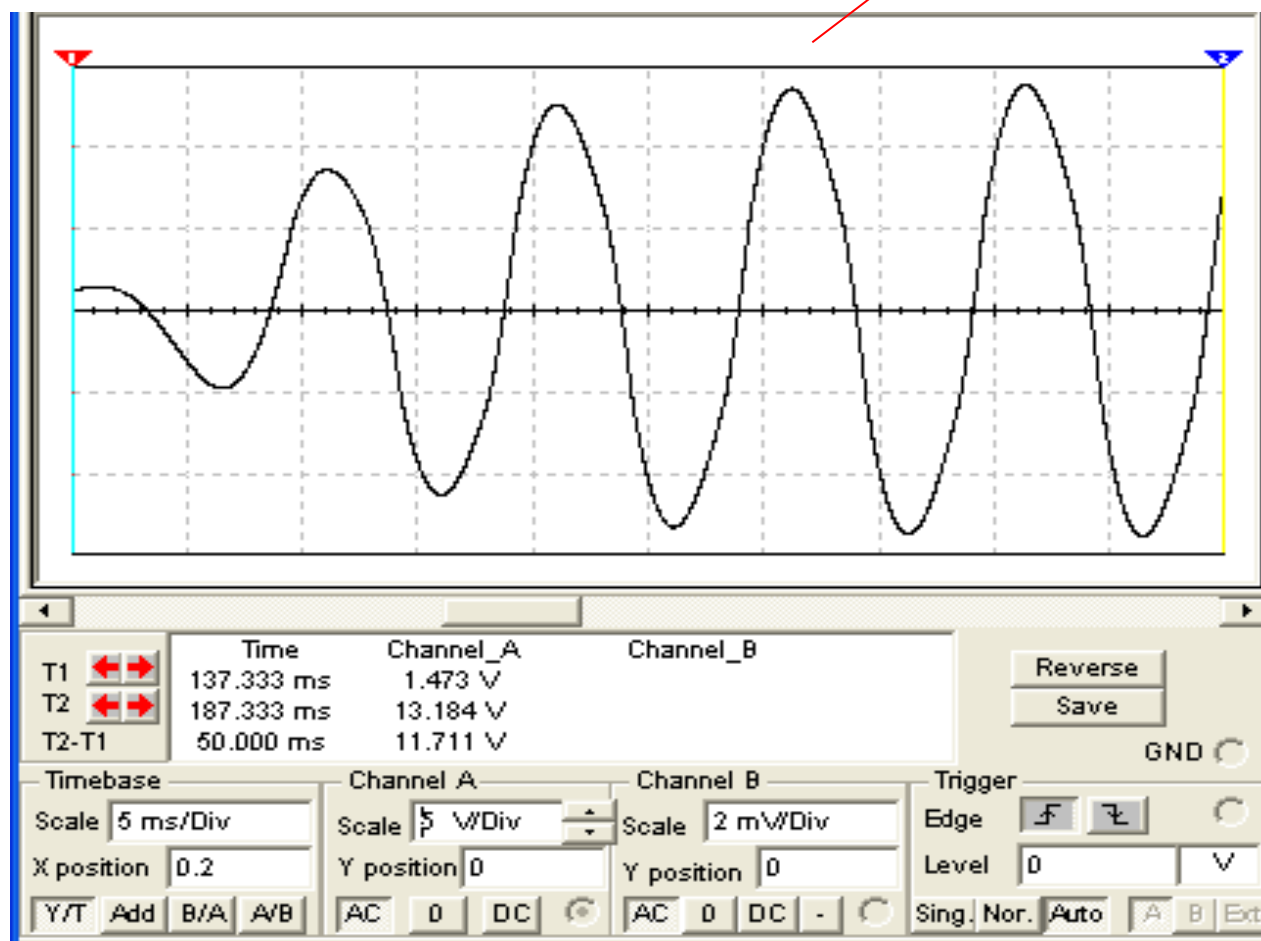
输出电压从幅值很小、含有丰富频率，到仅有一种频率且幅值由小逐渐增大直至稳幅。





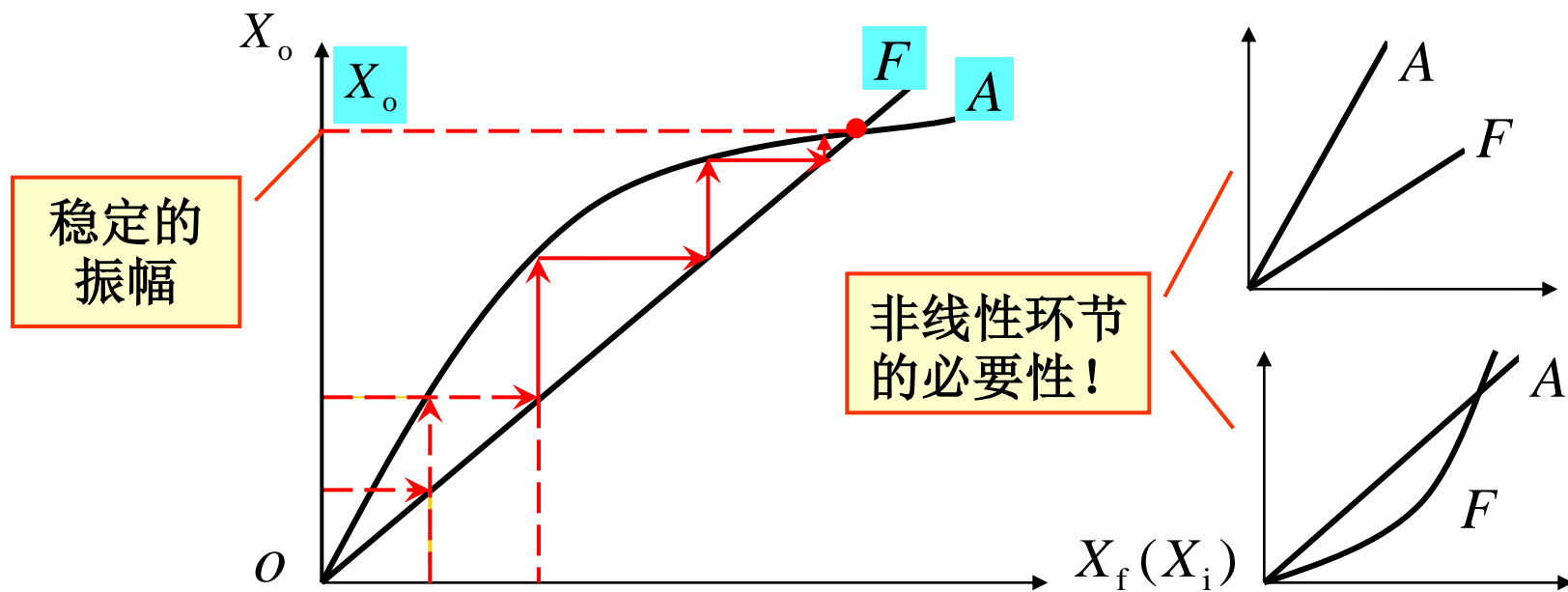
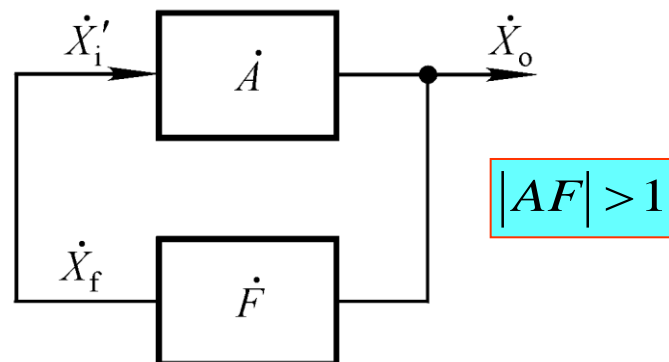


趋于稳幅





电路如何从起振到稳幅？



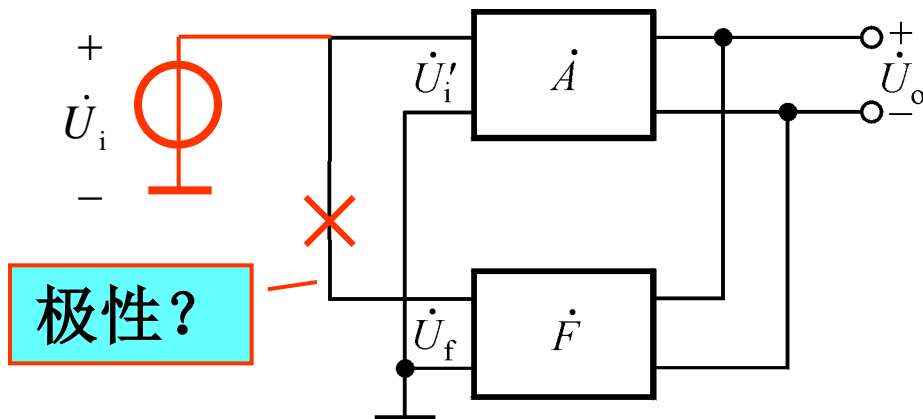
### 3. 基本组成部分

- 1) 放大电路：放大作用
  - 2) 正反馈网络：满足相位条件
  - 3) 选频网络：确定 $f_0$ ，保证电路产生正弦波振荡
  - 4) 非线性环节（稳幅环节）：稳幅
- } 常合二为一

### 4. 分析方法

- 1) 是否存在主要组成部分；
- 2) 放大电路能否正常工作，即是否有合适的 $Q$ 点，信号是否可能正常传递，没有被短路或断路；
- 3) 是否满足相位条件，即是否存在 $f_0$ ，是否可能振荡；
- 4) 是否满足幅值条件，即是否一定振荡。

## 相位条件的判断方法：瞬时极性法



在多数正弦波振荡电路中，输出量、净输入量和反馈量均为电压量。

断开反馈，在断开处给放大电路加  $f=f_0$  的信号  $U_i$ ，且规定其极性，然后根据

$U_i$  的极性  $\rightarrow U_o$  的极性  $\rightarrow U_f$  的极性

若  $U_f$  与  $U_i$  极性相同，则电路可能产生自激振荡；否则电路不可能产生自激振荡。

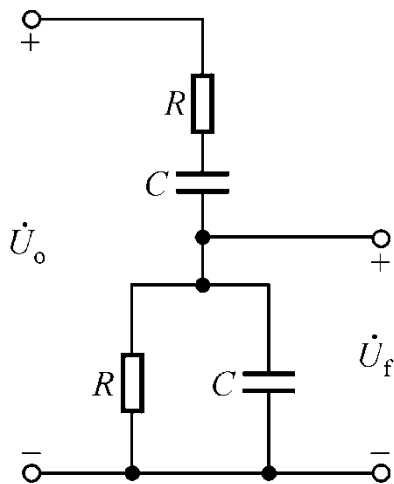
## 5. 分类

常用选频网络所用元件分类。

- 1)  **$RC$ 正弦波振荡电路**：1兆赫以下
- 2)  **$LC$ 正弦波振荡电路**：几百千赫~几百兆赫
- 3) **石英晶体正弦波振荡电路**：振荡频率稳定

## 4.2 RC 正弦波振荡电路

### 1. RC串并联选频网络

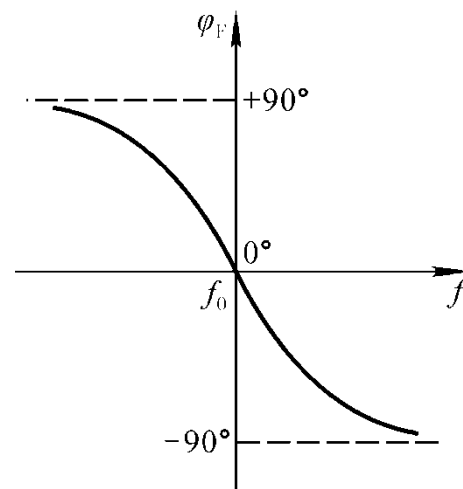
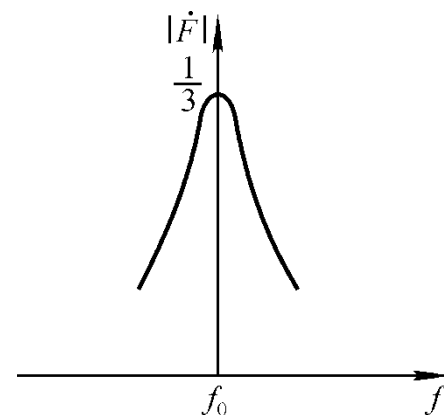


$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}}$$

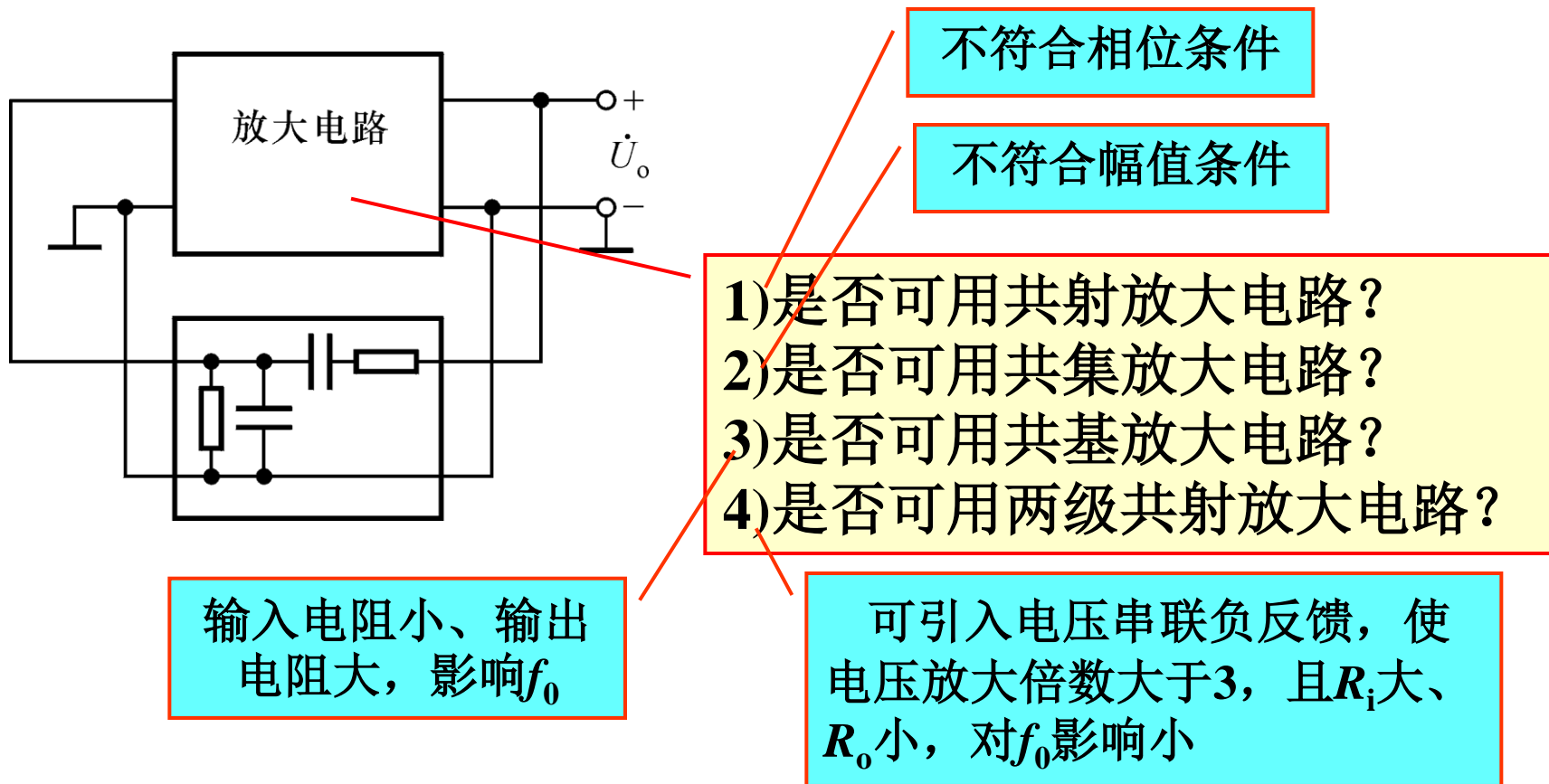
$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

$$\text{令 } f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ 则 } \dot{F} = \frac{1}{3 + j(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})}$$

当  $f=f_0$  时, 不但  $\varphi=0$ , 且  $|\dot{F}|$  最大, 为  $1/3$ 。



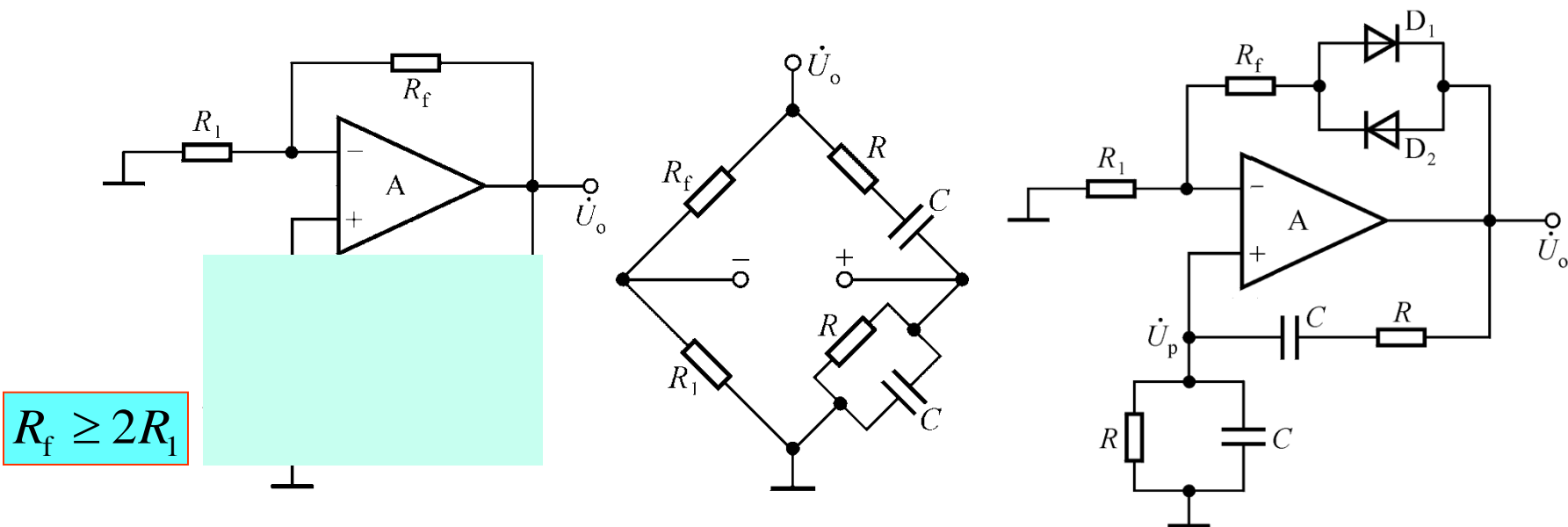
## 2. 电路组成



应为 $RC$  串并联网络配一个电压放大倍数略大于3、输入电阻趋于无穷大、输出电阻趋于0的放大电路。

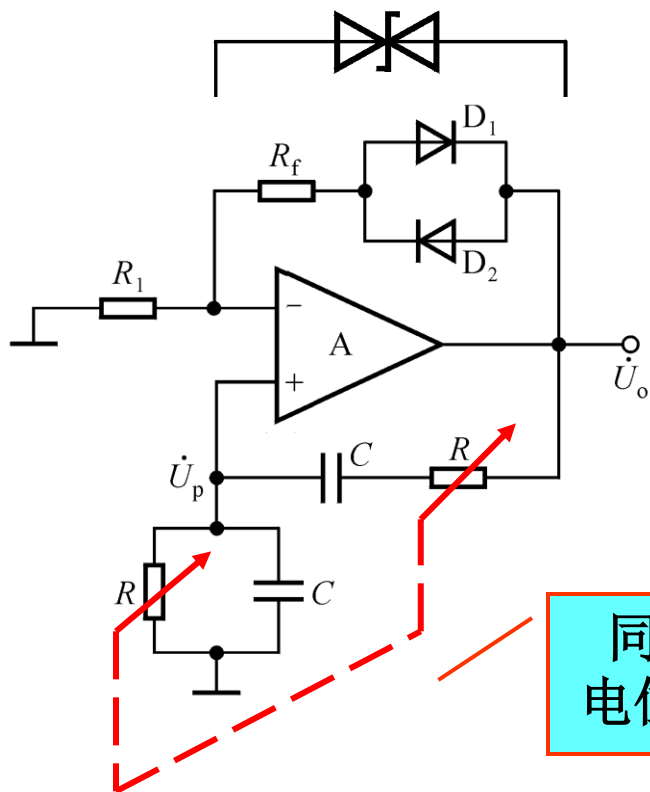
### 3. RC 桥式正弦波振荡电路 (文氏桥振荡器)

用同相比例运算电路作放大电路。



以**RC串并联网络**为选频网络和正反馈网络、并引入电压串联负反馈，两个网络构成桥路，一对顶点作为输出电压，一对顶点作为放大电路的净输入电压，就构成文氏桥振荡器。

## 频率可调的文氏桥振荡器



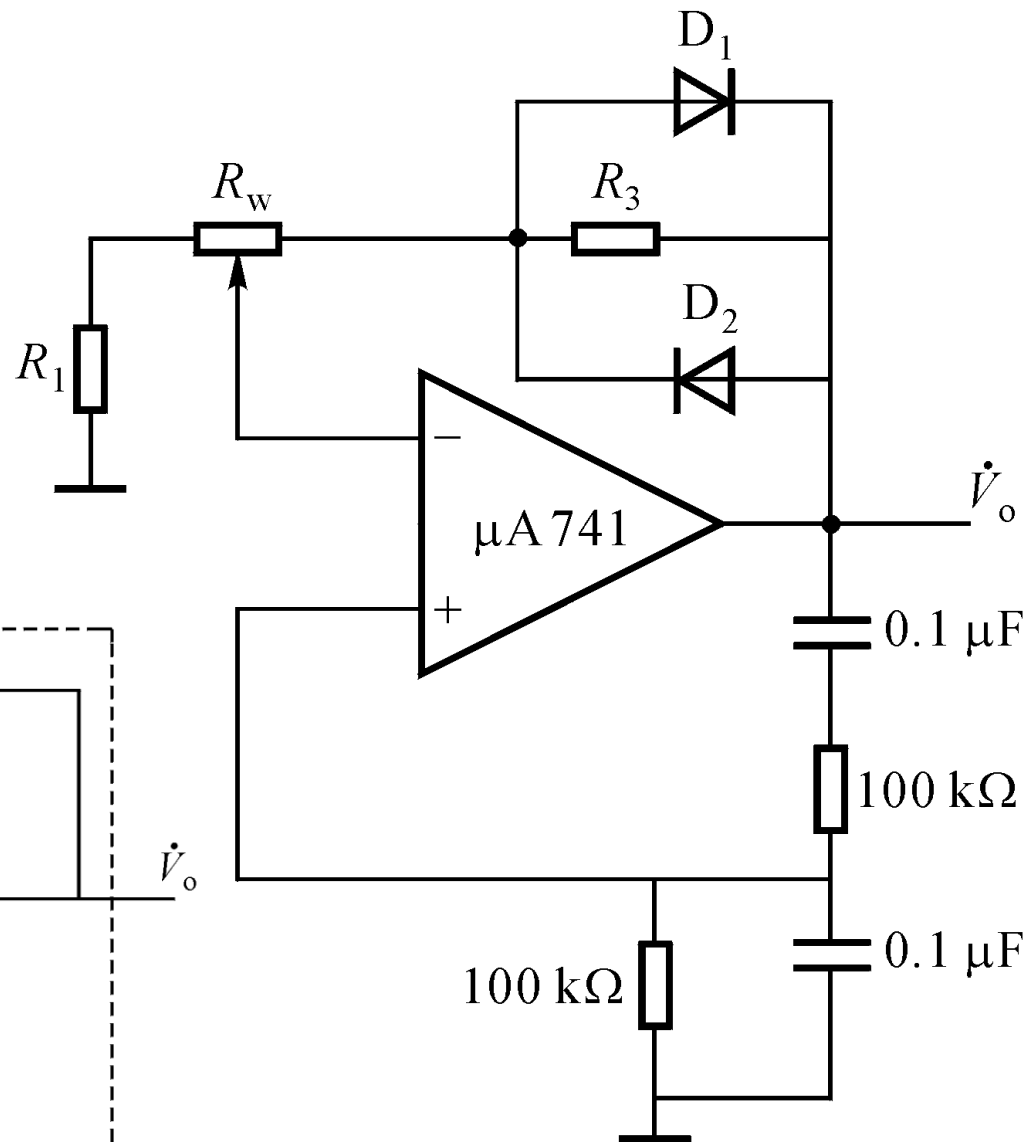
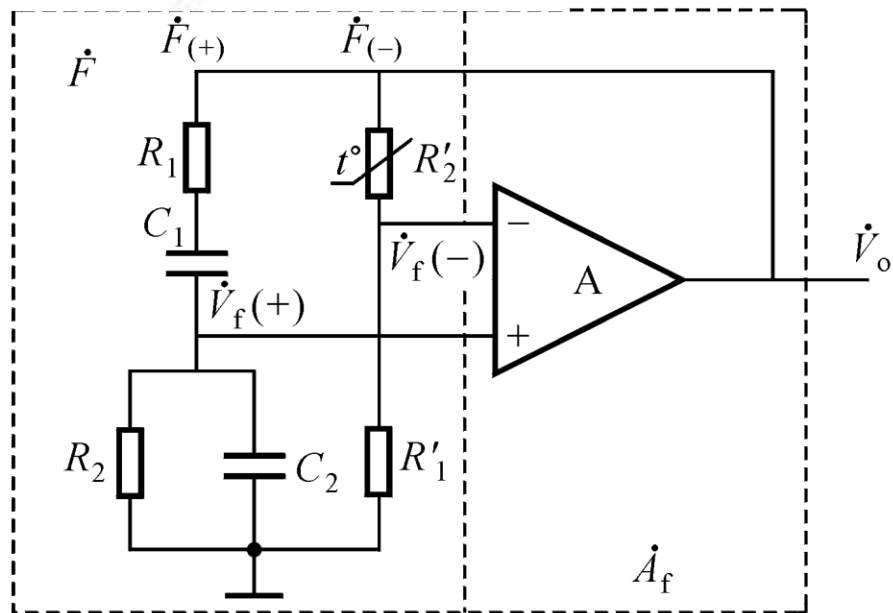
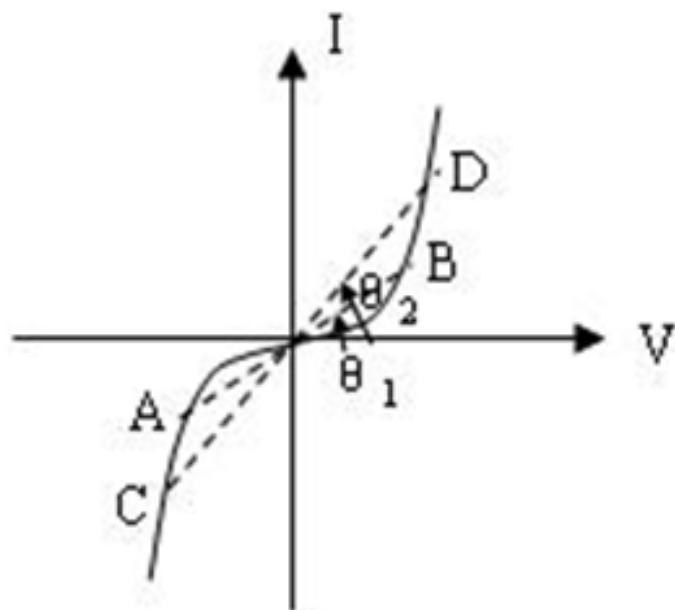
改变电容以粗调，改变电位器滑动端以微调。

加稳压管可以限制输出电压的峰-峰值。

同轴  
电位器



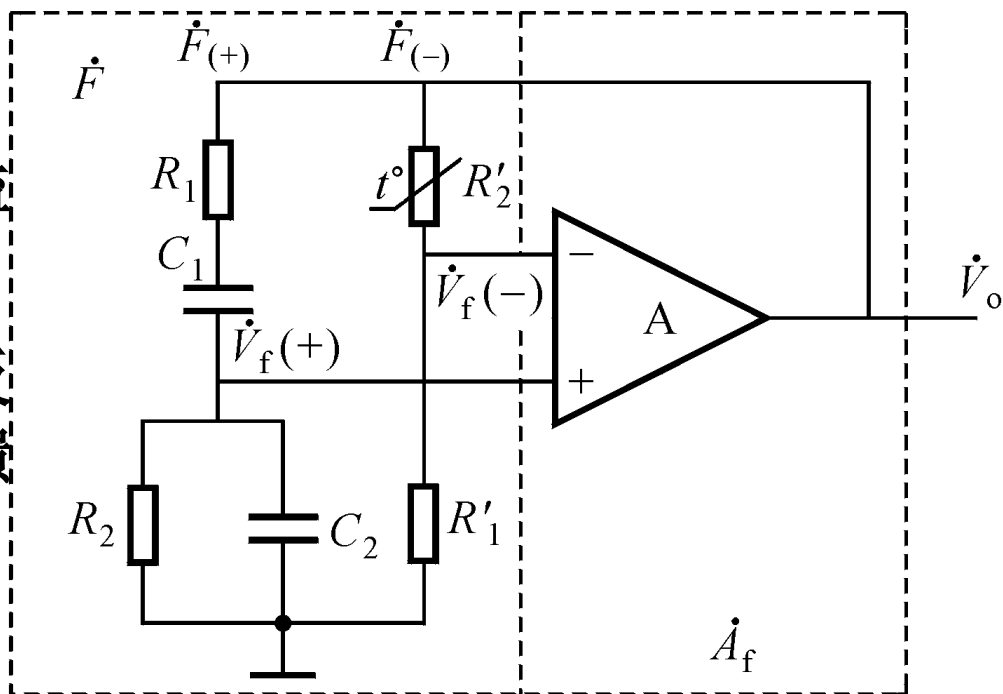
❖ 用二极管实现自动稳幅的RC正弦振荡电路。



## ➤ 稳幅环节

稳幅过程实际上是使环路增益  $A\dot{F}$  自动保持在1的过程。

当输出幅度增加时，希望负反馈加强；幅度减少时，负反馈减弱。



$$\frac{\Delta \dot{A}_f}{\Delta u_o} < 0, \quad \text{或} \quad \frac{\Delta \dot{F}_{(+)}}{\Delta u_o} < 0$$

$$A_f = 1 + \frac{R_2'}{R_1'} \quad \mathbf{T} \uparrow \rightarrow \begin{cases} R_2' \downarrow \\ R_1' \uparrow \end{cases}$$

$$\dot{F}_{(+)} = \frac{\dot{V}_f(+)}{\dot{V}_o} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

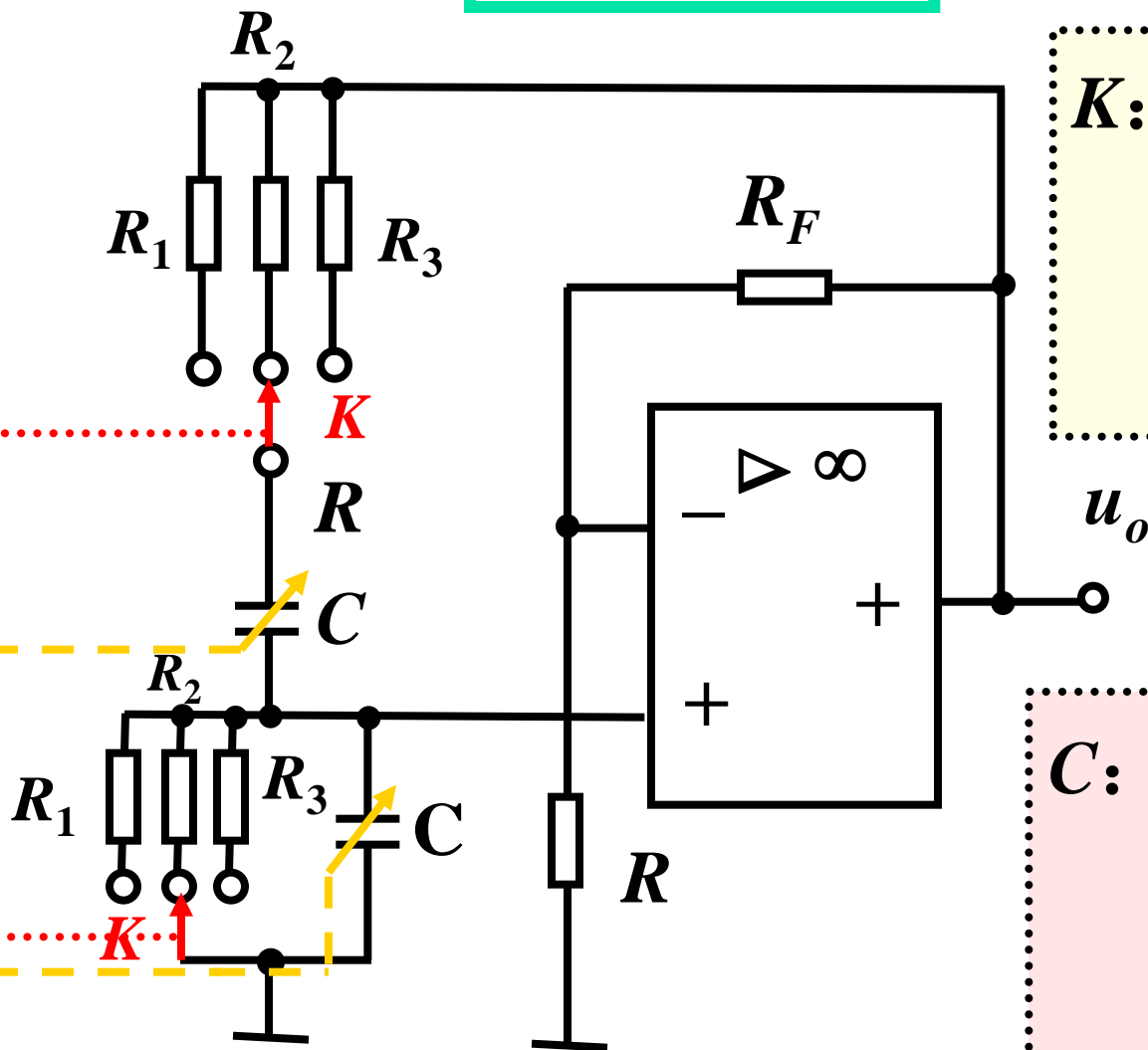
正温度系数热敏电阻代替  $R_1'$ ；

负温度系数热敏电阻代替  $R_2'$ 。

输出频率的调整:

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

通过调整 $R$ 或/和 $C$ 来调整频率。

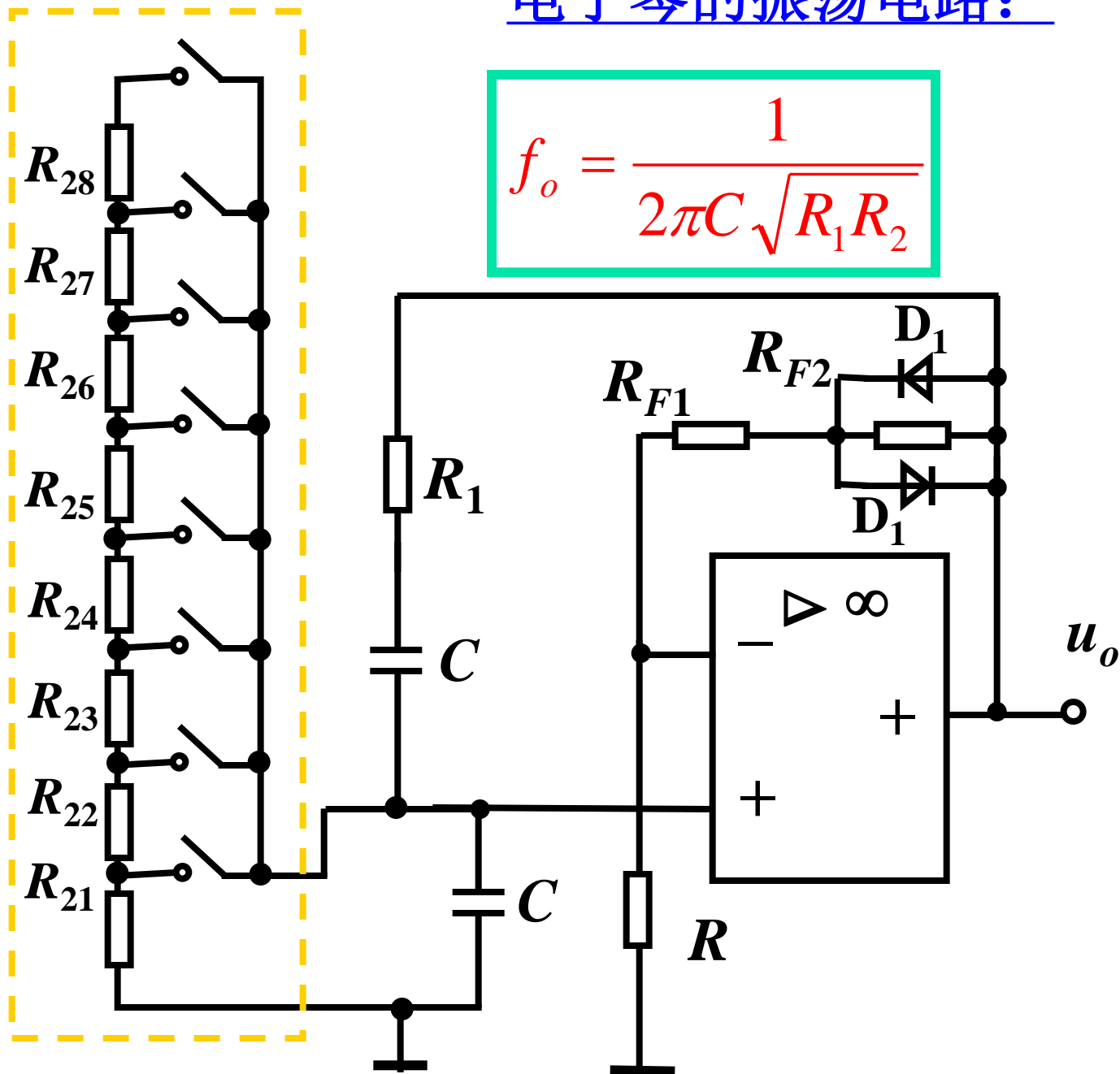


$K$ : 双联波段开关, 切换 $R$ , 用于粗调振荡频率。

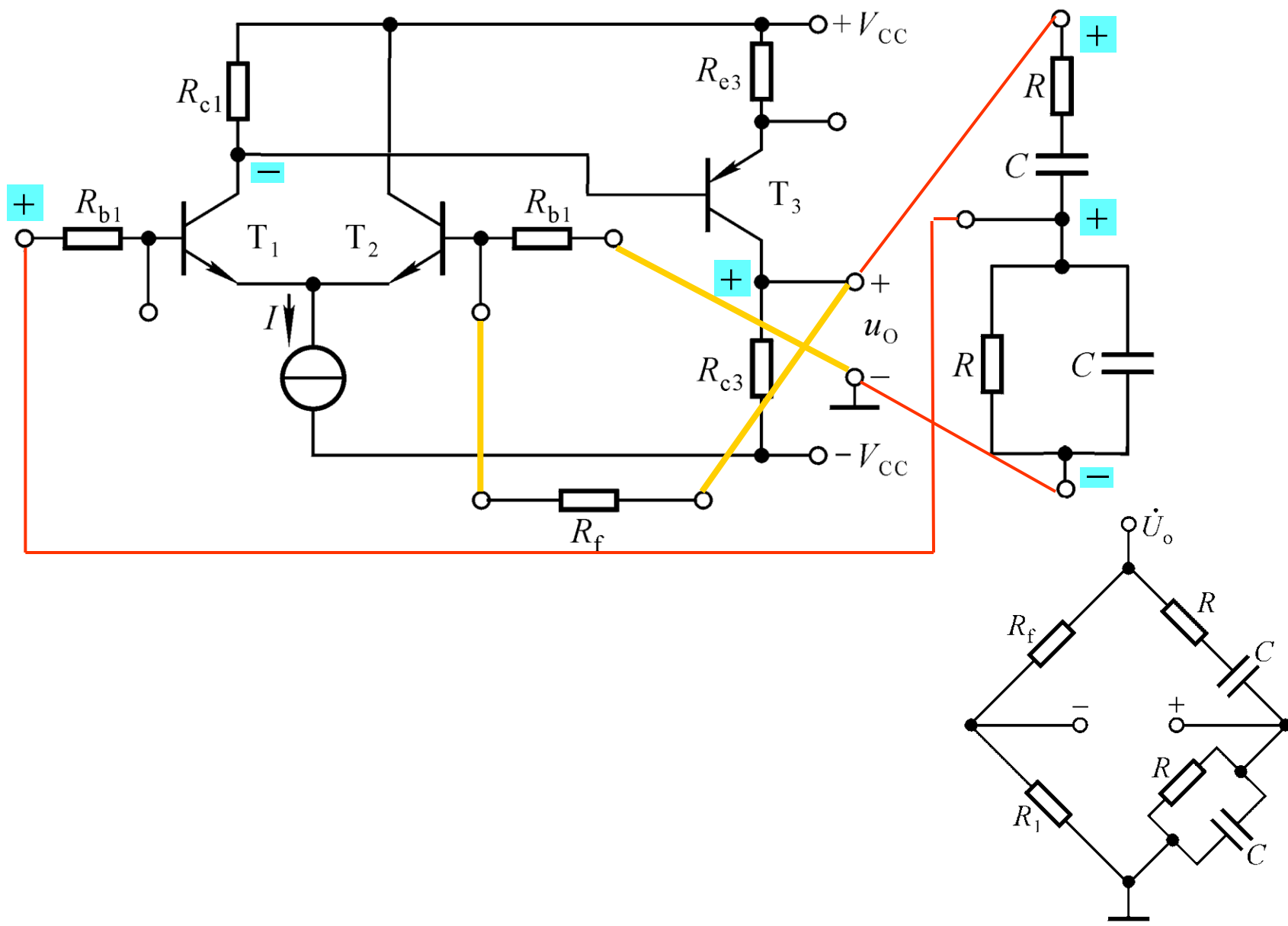
$C$ : 双联可调电容, 改变 $C$ , 用于细调振荡频率。

## 电子琴的振荡电路：

$$f_o = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1 R_2}}$$

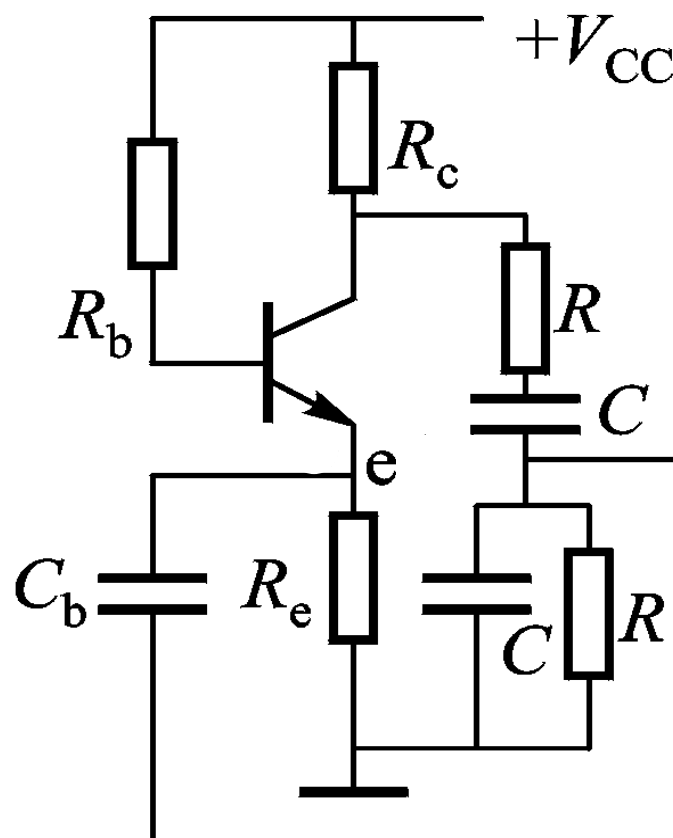
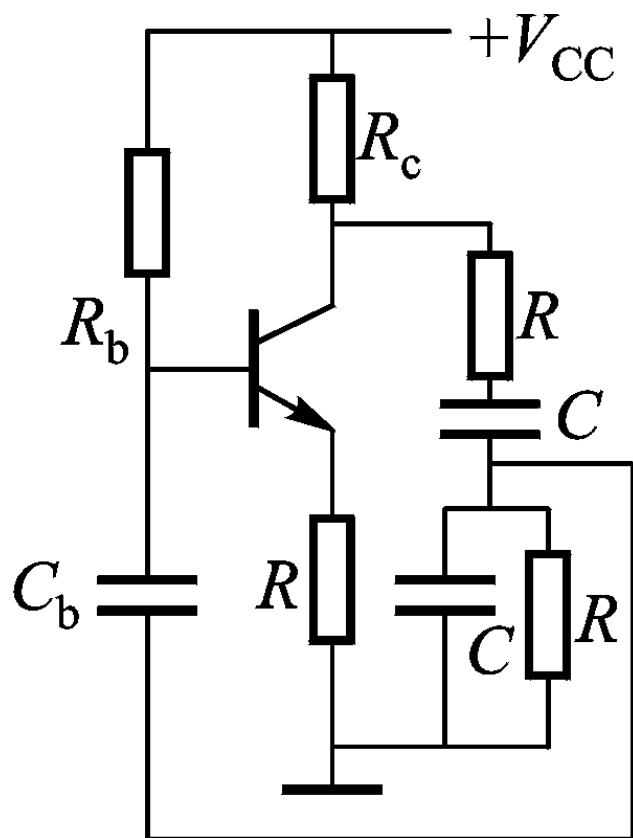


## 讨论一：合理连接电路，组成文氏桥振荡电路



■ 【例1】

判断电路是否能产生正弦波振荡

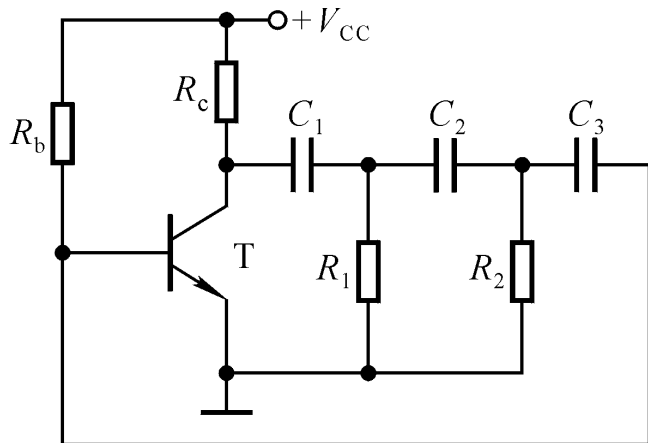


共基电路

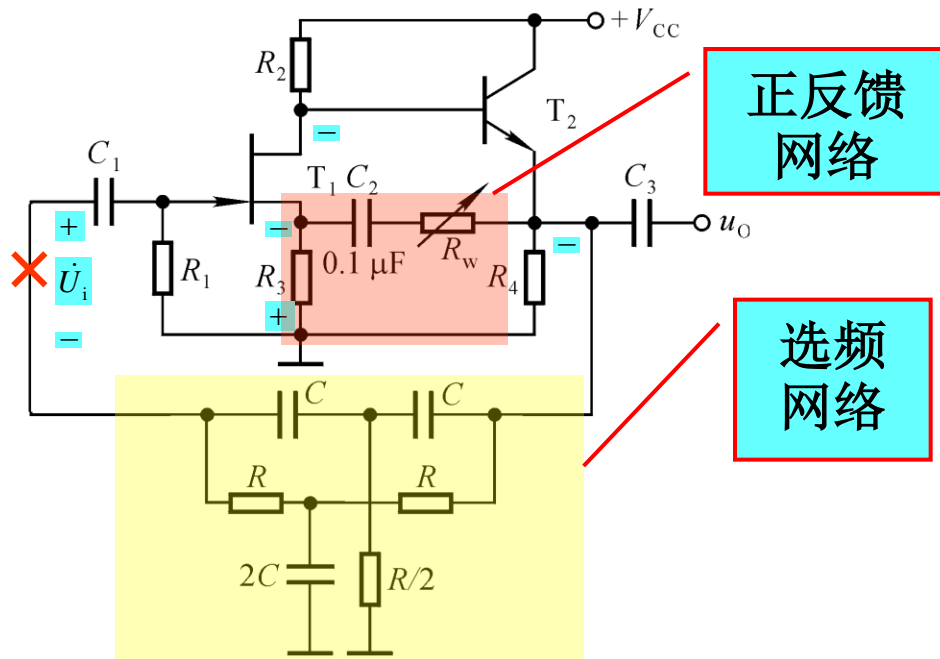
## 讨论二：判断图示电路有可能产生正弦波振荡吗？

### RC 双T选频网络

### RC 移相式电路



- 1) RC 移相电路有几级才可能产生正弦波振荡？
- 2) 若  $R$  和  $C$  互换呢？



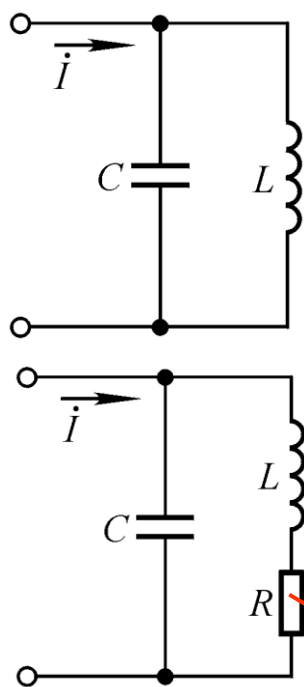
选频网络和正反馈网络是两个网络。

## 4.3 LC正弦波振荡器

➤以LC并联谐振回路作为选频网络，振荡频率即为谐振频率。

### 1. LC并联网络的选频特性

➤振荡频率一般在几百千赫以上。



理想LC并联网络在谐振时呈纯阻性，且阻抗无穷大。

谐振频率为

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

在损耗较小时，品质因数及谐振频率

$$Q \approx \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

损耗

在 $f=f_0$ 时，电容和电感中电流各约为多少？网络的电阻为多少？

**LC振荡器：Q大选频特性好，频率高，起振容易**



电路谐振时，谐振回路电流比外电路的电流大得多，所以可以略去外电路的参数影响。

### ❖ 谐振特性和品质因数

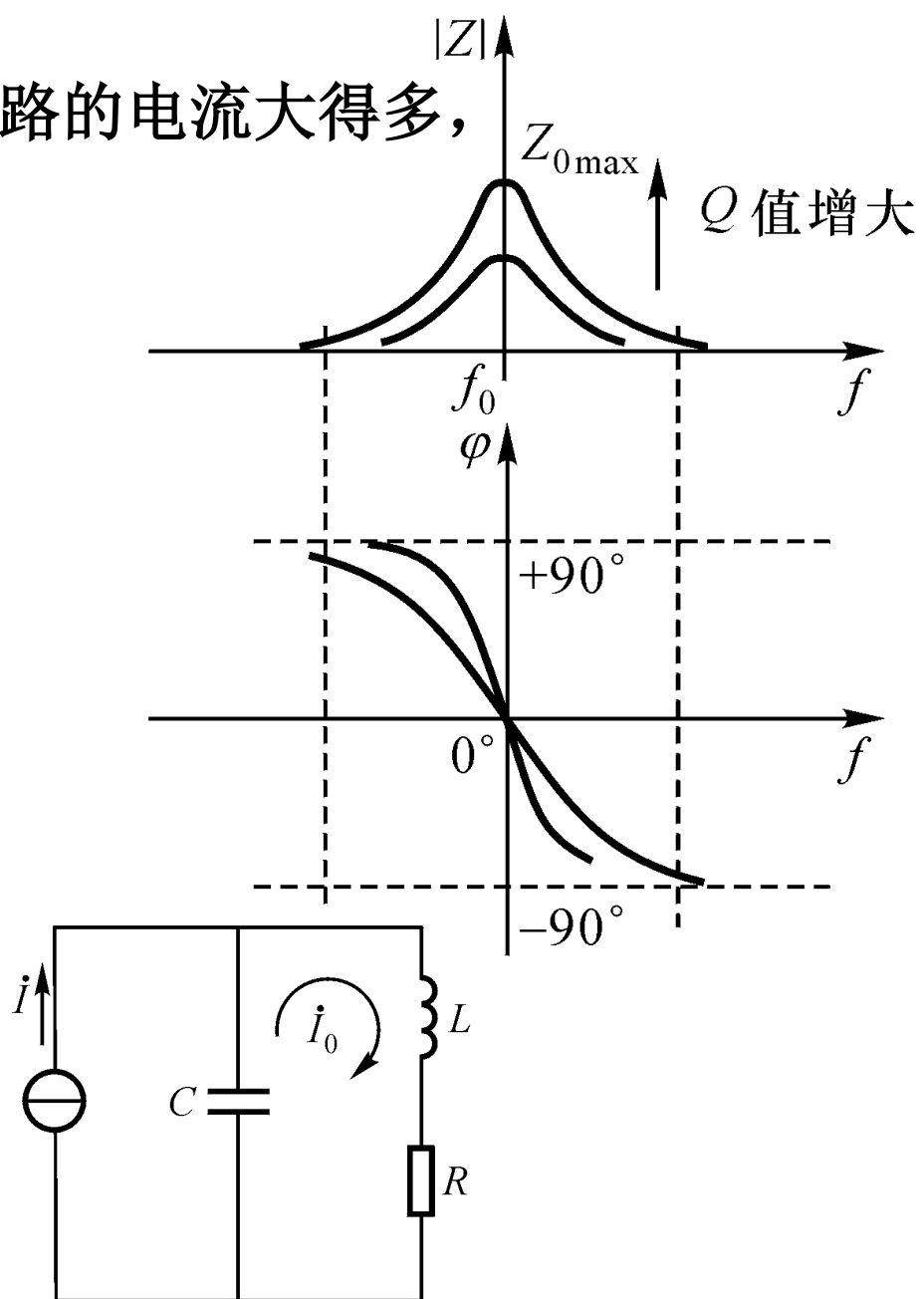
$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Q 越高，选频特性越好。

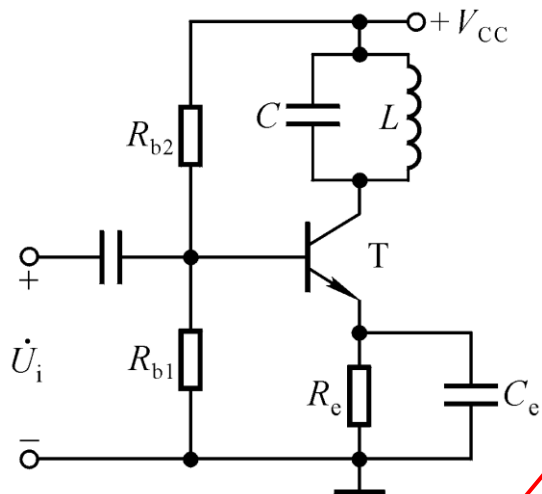
### ❖ LC电路的振荡条件

✓ 采用共射、共基放大，增益大，只要满足正反馈（相位条件）就能振荡。

✓ 静态参数

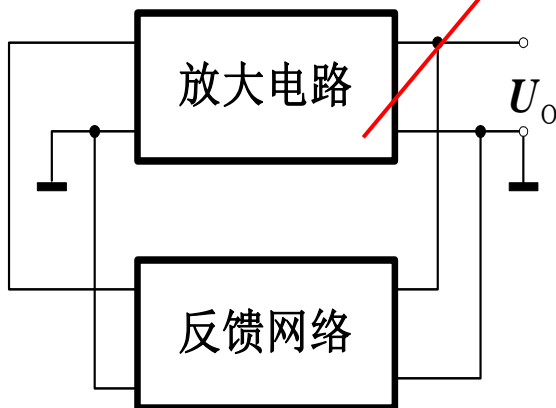


## LC选频放大电路→正弦波振荡电路



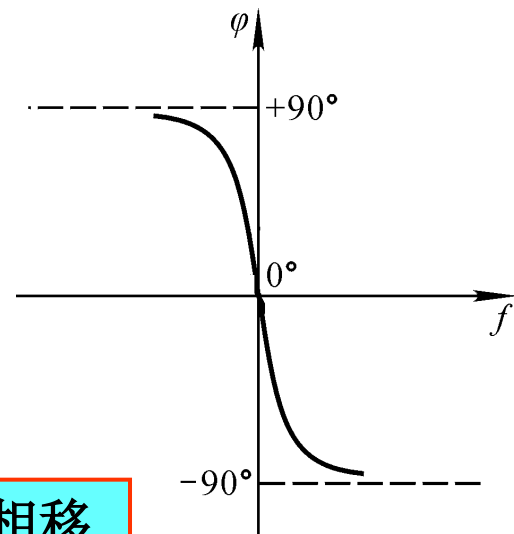
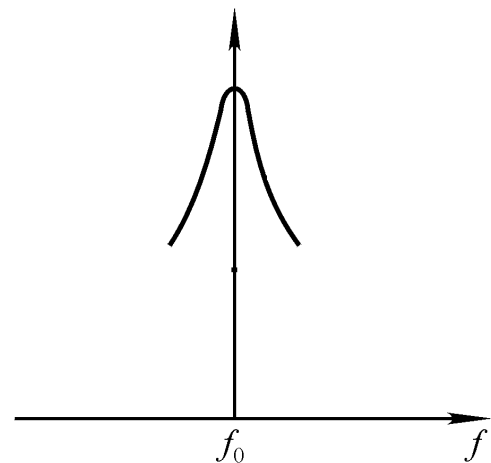
当  $f=f_0$  时，电压放大倍数的数值最大，且附加相移为0。

共射电路  
 $\varphi_A = -\pi$

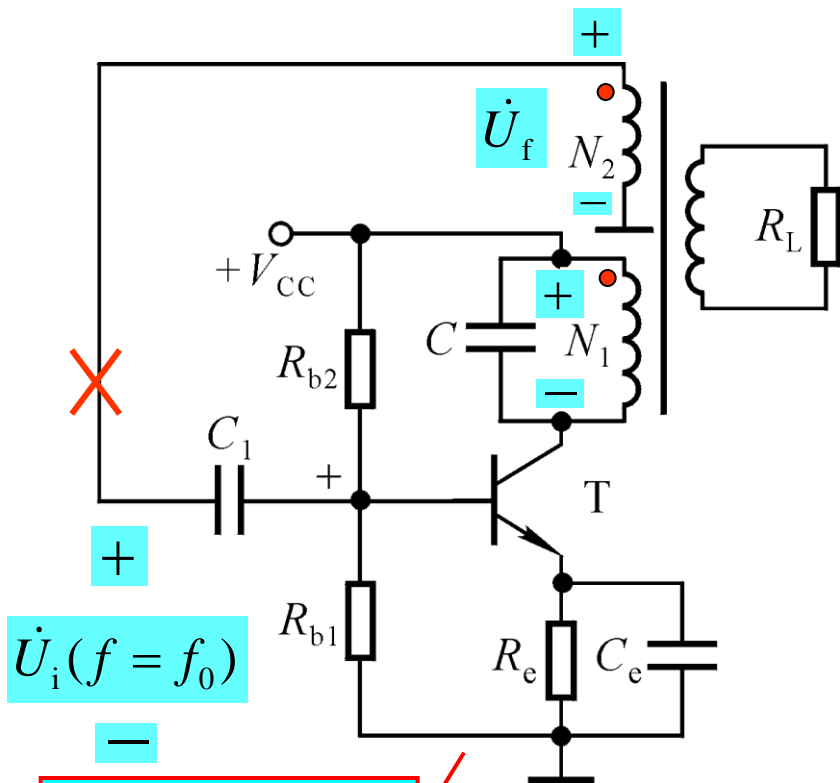


构成正弦波振荡电路最简单的做法是通过变压器引入反馈。

附加相移



## 2. 变压器反馈式电路



为什么用分立元件放大电路

为使 $N_1$ 、 $N_2$ 耦合紧密，将它们合二为一，组成电感反馈式电路。如何组成？

必须有合适的同铭端！

分析电路是否可能产生正弦波振荡的步骤：

- 1) 是否存在四个组成部分
- 2) 放大电路是否能正常工作
- 3) 是否满足相位条件
- 4) 是否可能满足幅值条件

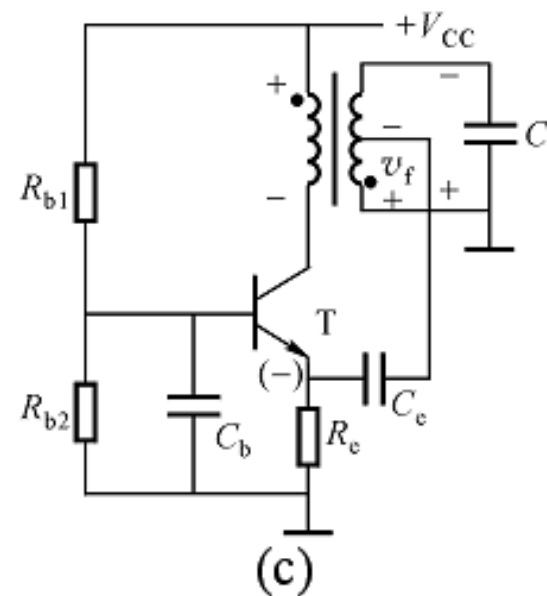
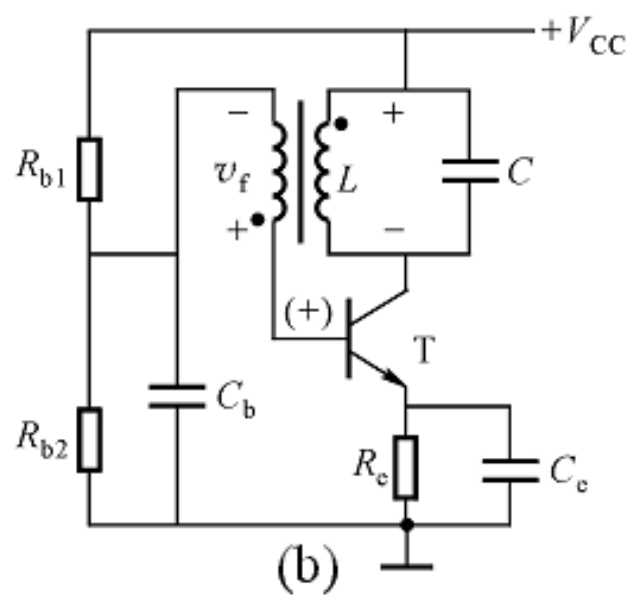
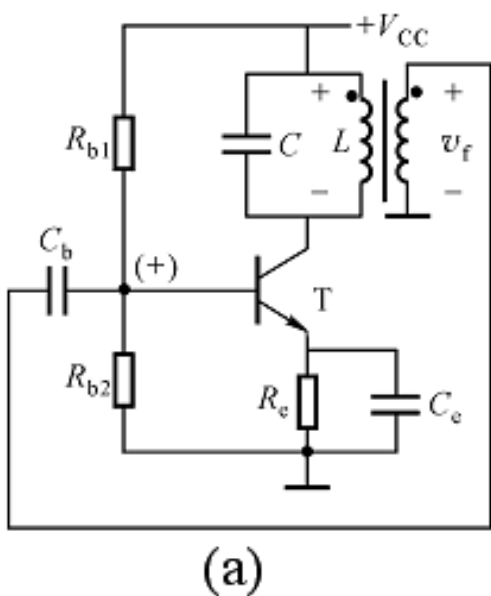
$C_1$ 是必要的吗？

特点：

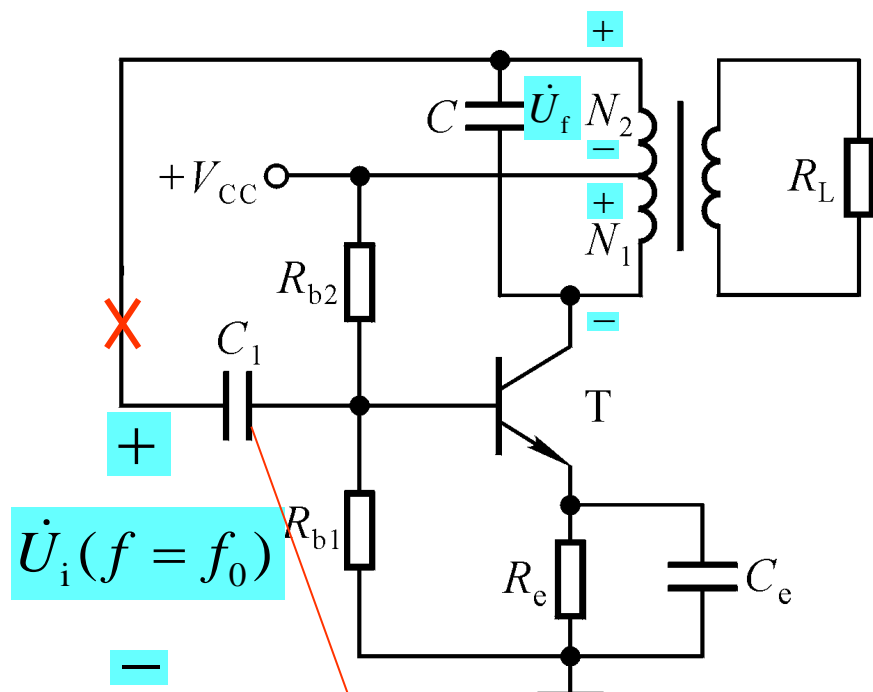
易振，波形较好；耦合不紧密，损耗大，频率稳定性不高。

## 变压器反馈式正弦波振荡器

例 有以下三个变压器反馈式的电路，试分析能否产生正弦振荡？



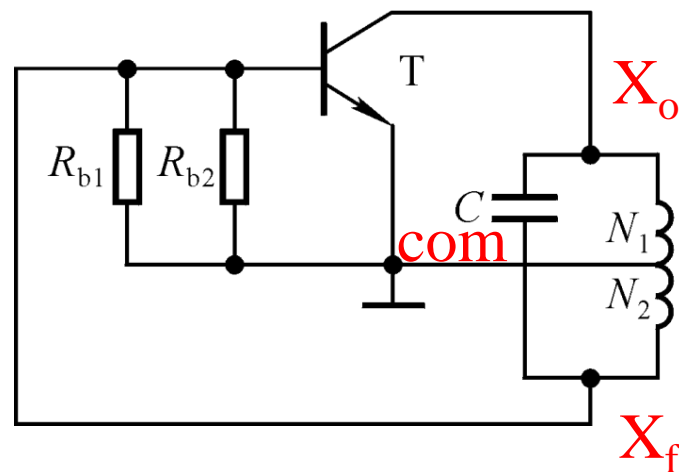
### 3. 电感反馈式电路



必要吗？

反馈电压取自哪个线圈？  
反馈电压的极性？

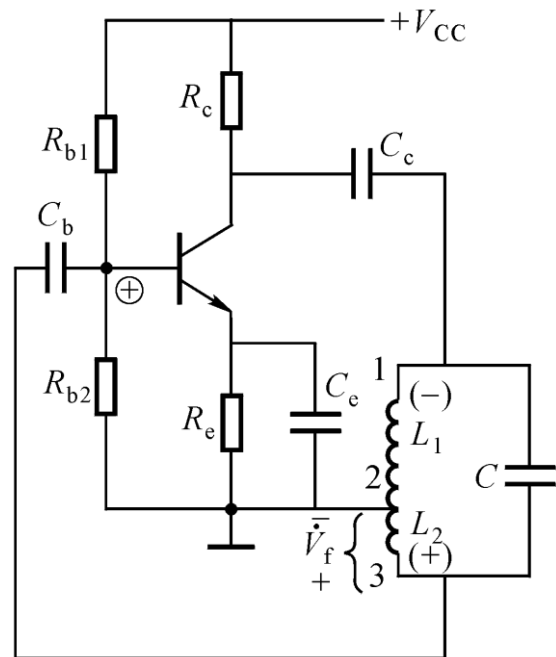
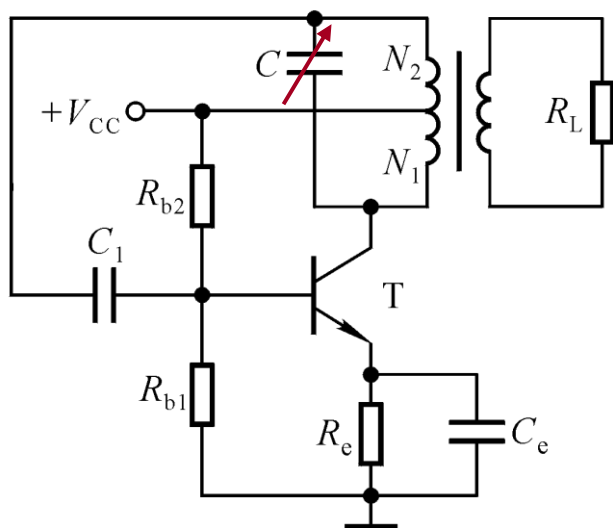
电路特点？



电感的三个抽头分别接晶体管的三个极，故称之为电感三点式电路。

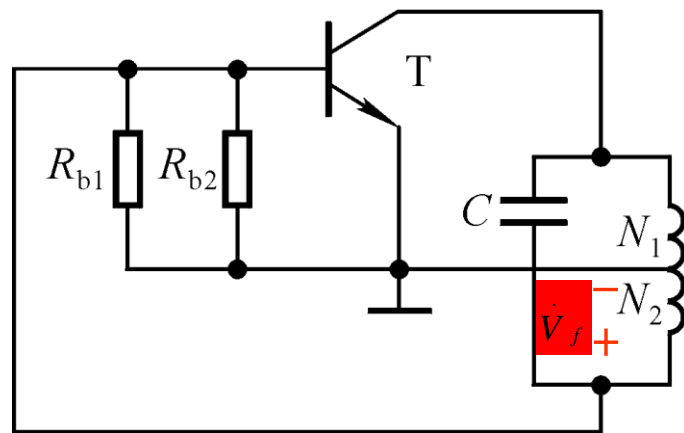
三点式： $LC$ 并联谐振电路的三个引出端分别与三极管的三个电极（或运算放大器的三个端子）相连接，然后组成振荡器。

### 3. 电感反馈式电路 – Hartley振荡器



特点：耦合紧密，易振，振幅大， $C$ 用可调电容可获得较宽范围的振荡频率。波形较差，常含有高次谐波。

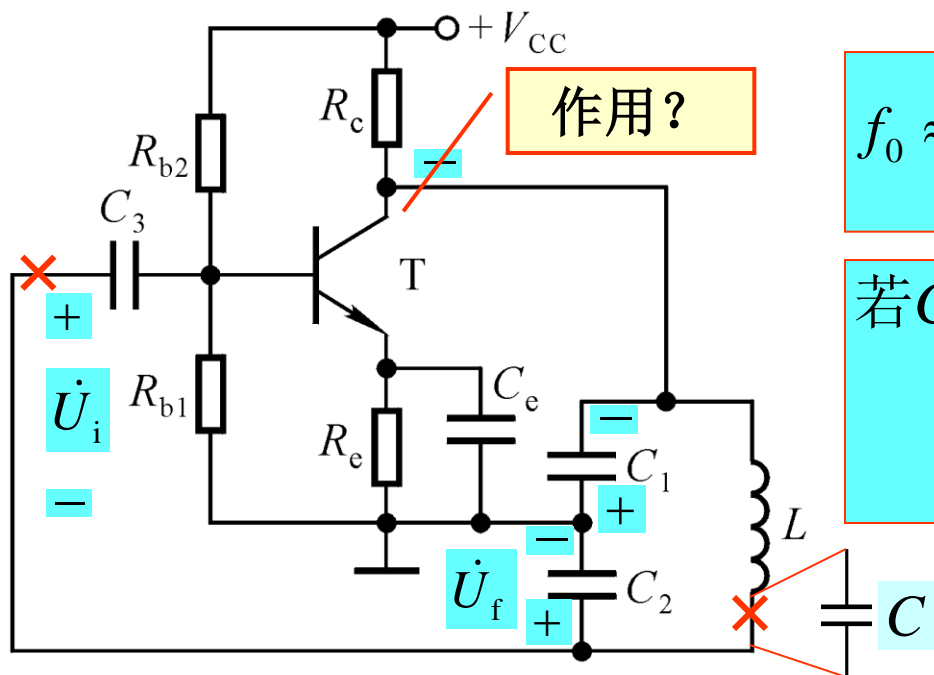
由于电感对高频信号呈现较大的电抗，故波形中含高次谐波，为使振荡波形好，采用电容反馈式电路。



因为放大电路的输入电阻就是它自身的负载，故 $\dot{A}$ 与 $\dot{F}$ 具有相关性；若增大 $N_1$ ，则 $|\dot{A}|$ 增大， $|\dot{F}|$ 减小。

基极注入

#### 4. 电容反馈式（电容三点式）电路 – Colpitts振荡器



$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}}$$

若  $C \ll C_1$  且  $C \ll C_2$ , 则

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

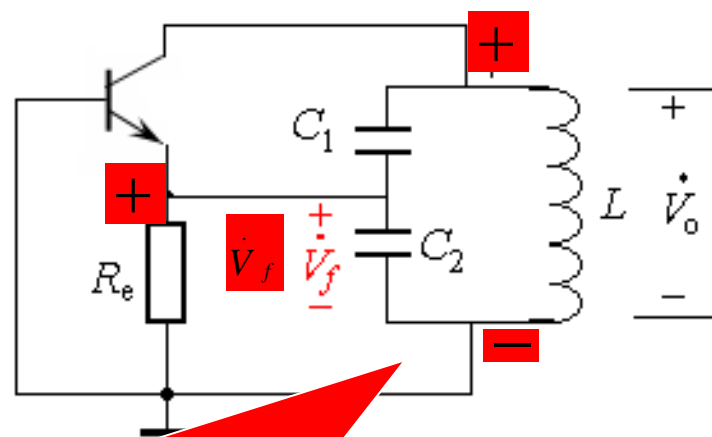
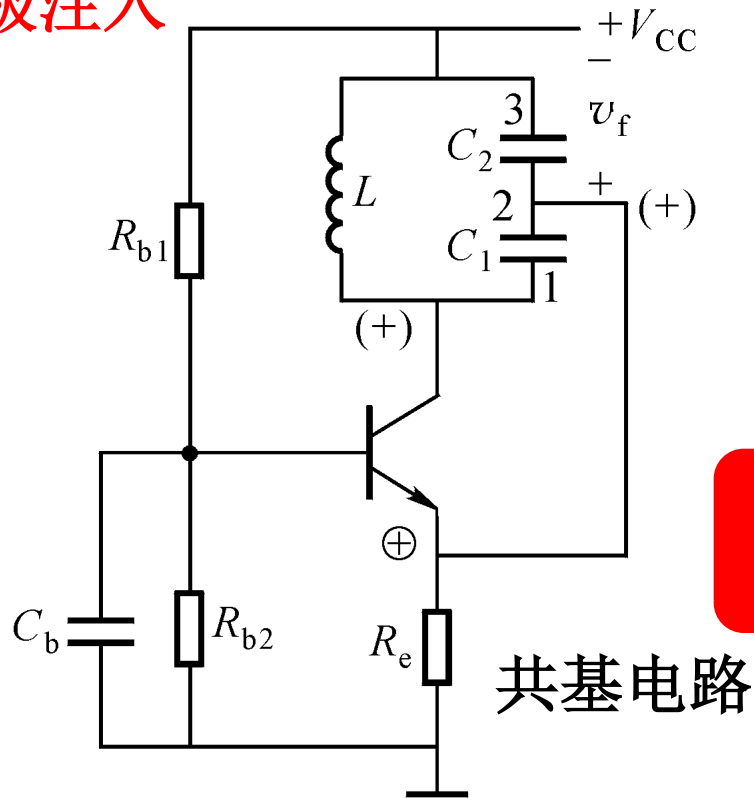
与放大电路参数无关

若要振荡频率高，则  $L$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  的取值就要小。当电容减小到一定程度时，晶体管的极间电容将并联在  $C_1$  和  $C_2$  上，影响振荡频率。

特点：波形好，振荡频率调整范围小，适于频率固定的场合。

# 电容三点式 $LC$ 正弦振荡器

射极注入



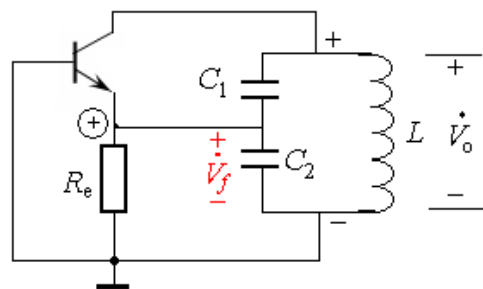
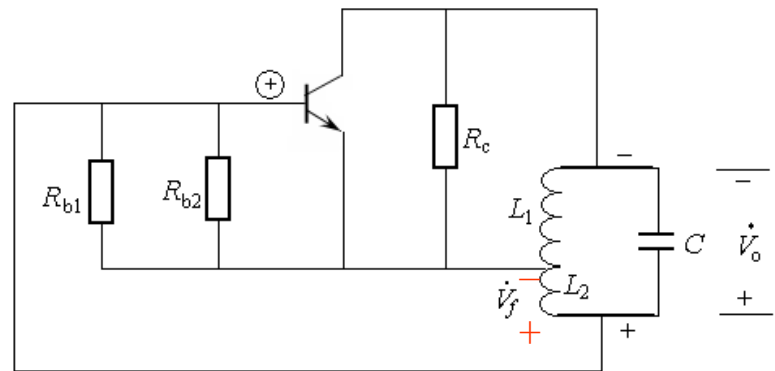
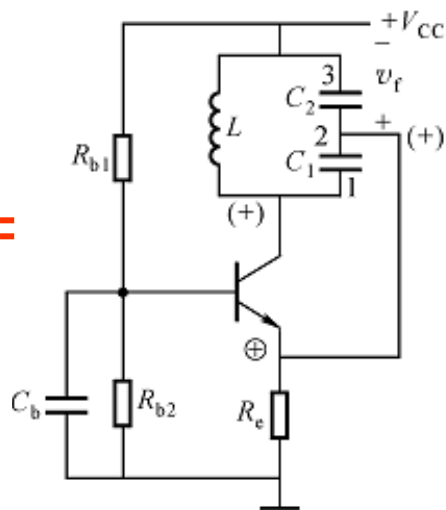
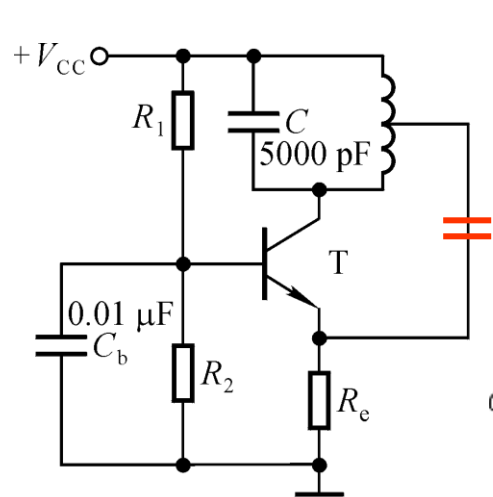
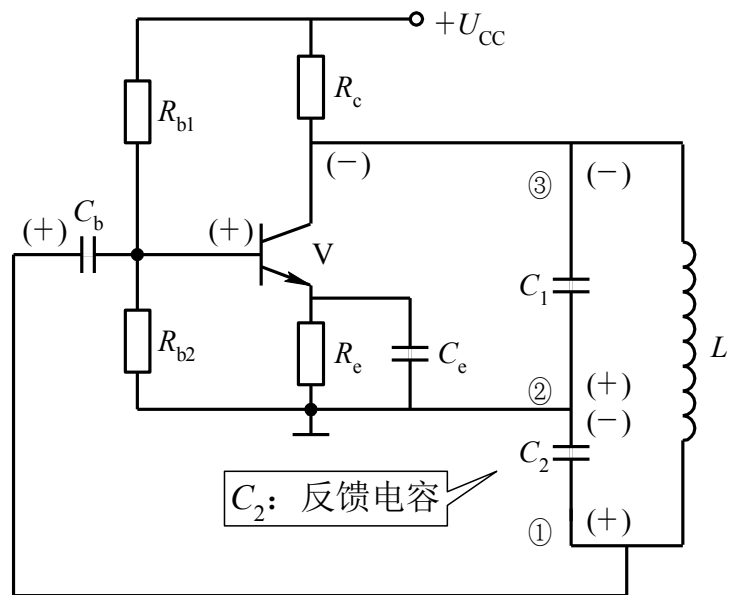
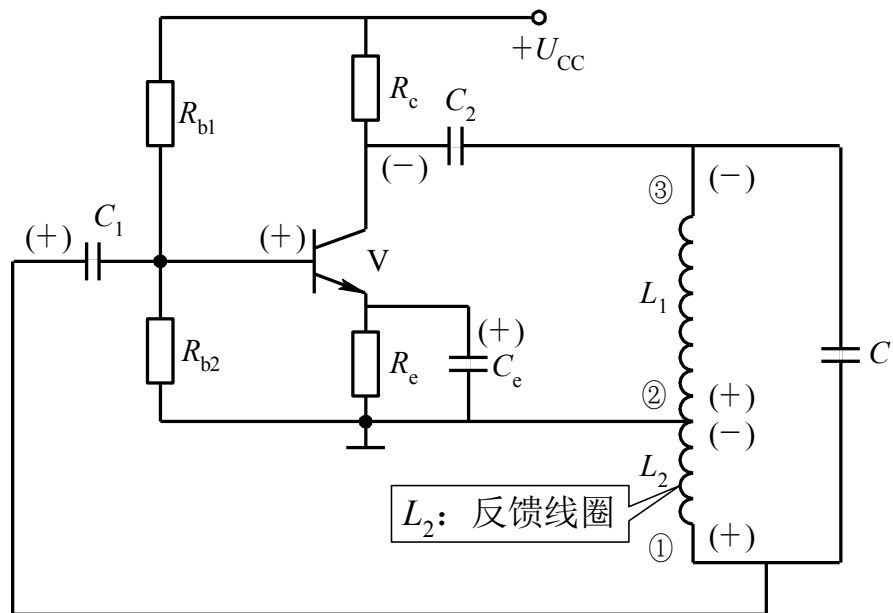
电容三点式振荡电路在振荡频率 $f_0$ 时的交流通路

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}$$

反馈电压取自 $C_2$ 。优点是波形好，原因是反馈信号取自电容两端，不含有高次谐波。缺点是不容易起振。



# 典型的LC三点式振荡器



## 例题:

- (9) 电路如图 1-3 所示。为使电路产生稳定的正弦振荡，标明集成运放中的同相和反相输入端符号“+”、“-”；并说明  $R_f$  和  $R_1$  必须满足什么关系？\_\_\_\_\_
- (10) 在图 1-4 中画出连线，使构成电容三点式正弦波振荡电路。

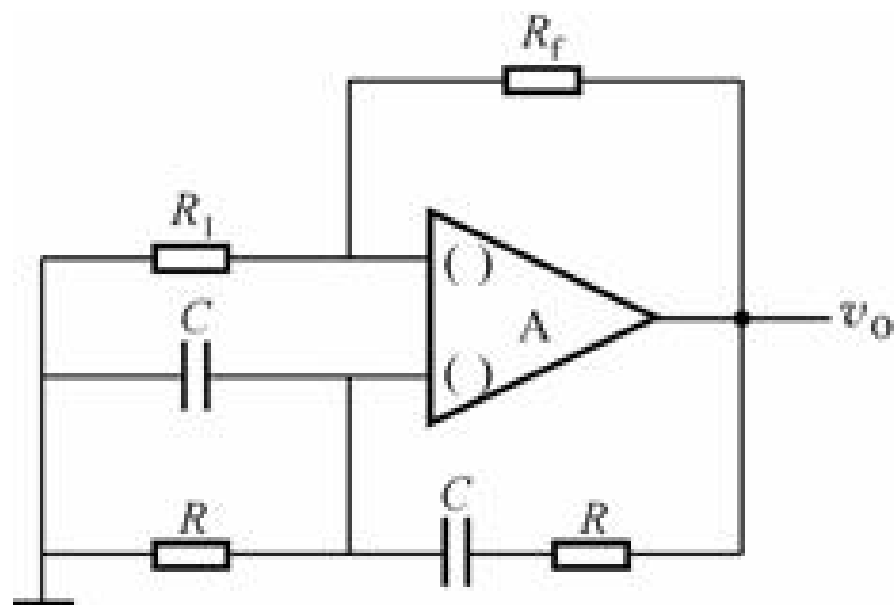


图 1-3

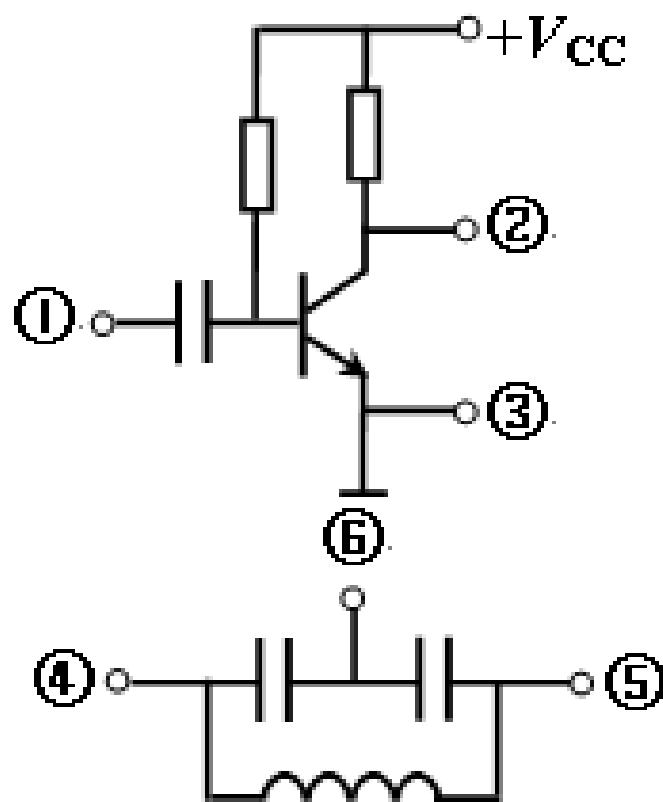
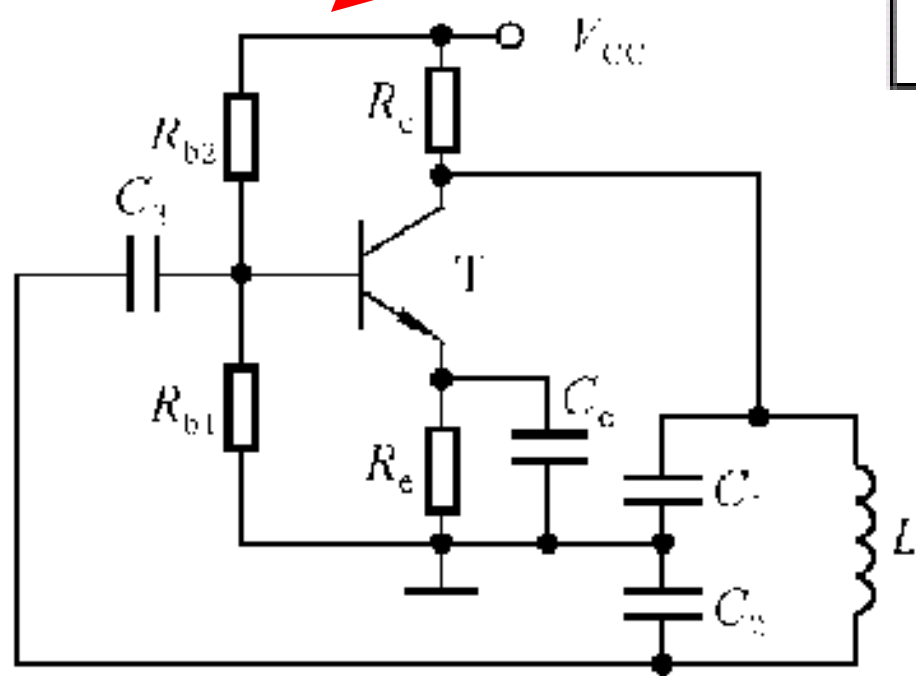
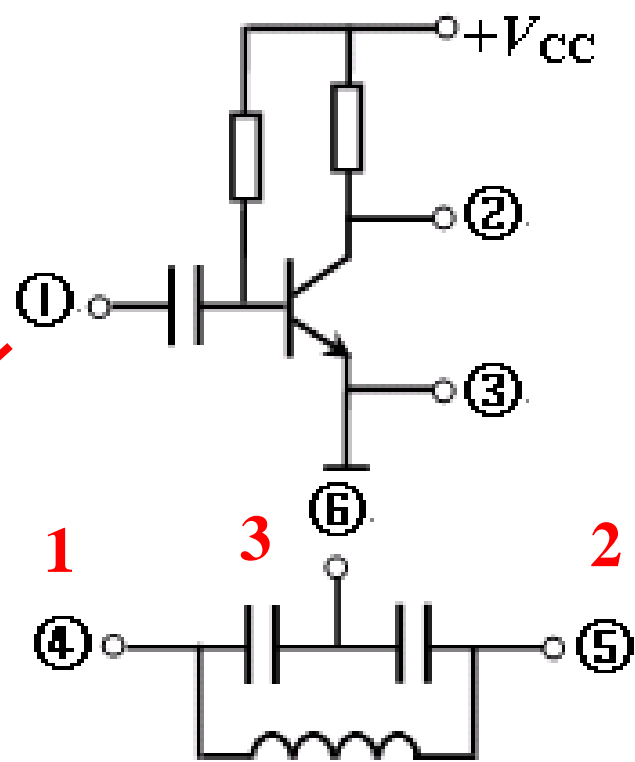
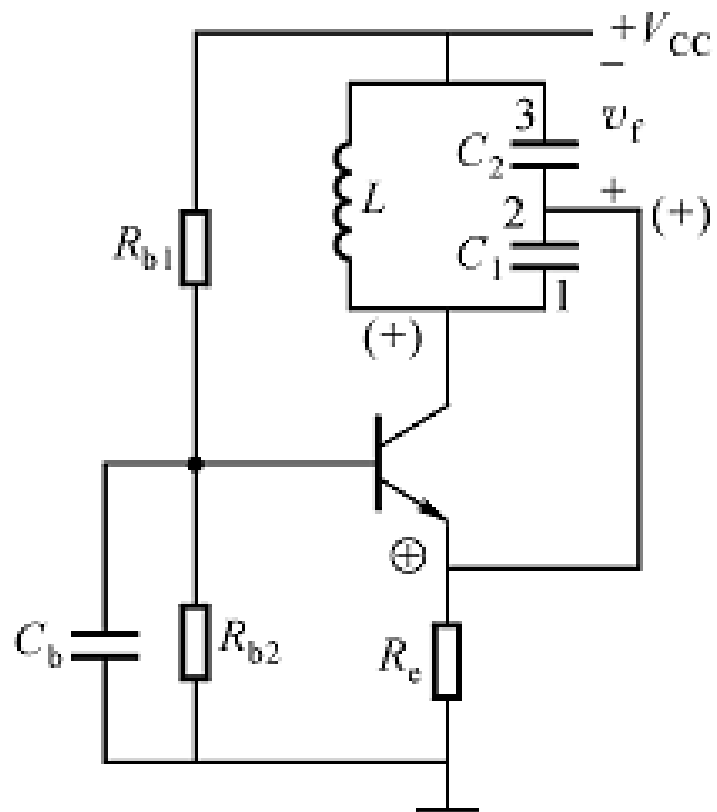
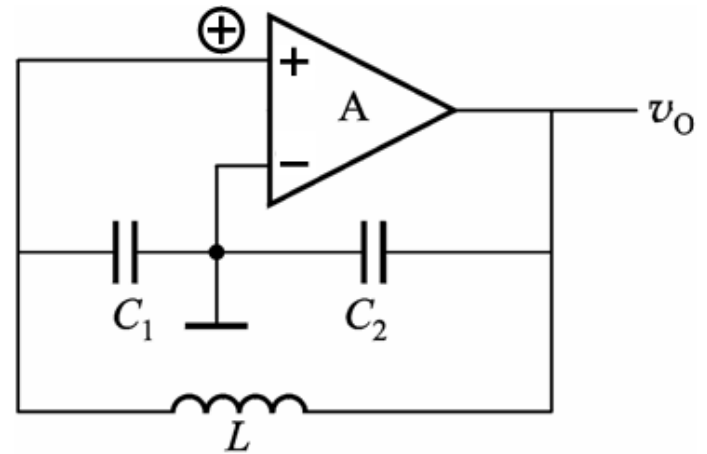


图 1-4





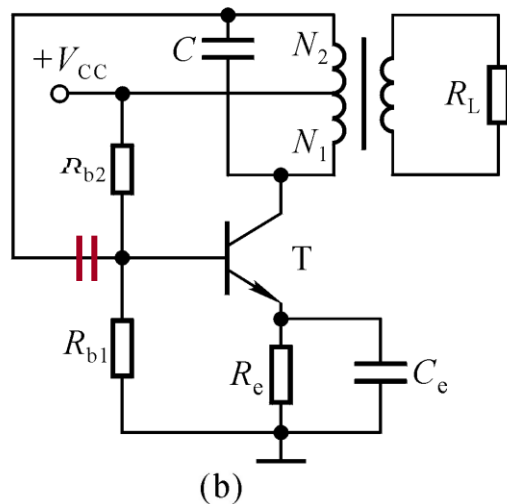
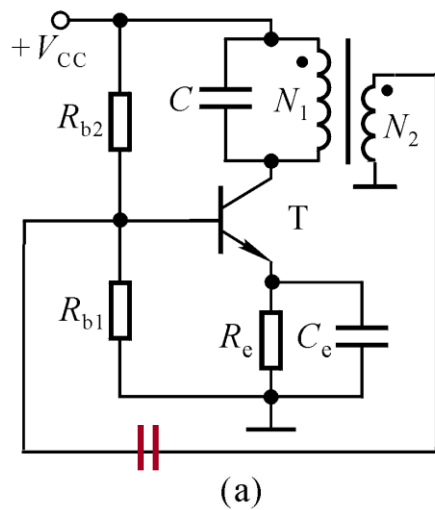
图示电路。定义信号注入点瞬时极性如图所示。

则器件 \_\_\_\_\_ ( $C_1$ 、 $C_2$ 、 $L$ 、 $C_1+C_2$ 、 $C_1+L$ 、 $C_2+L$ )

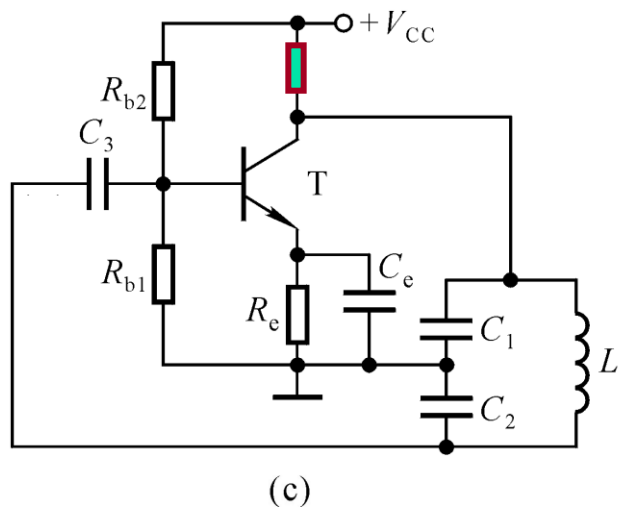
两端电压即为反馈电压；

且反馈电压的瞬时极性为：\_\_\_\_\_（正、负、无法确定）。

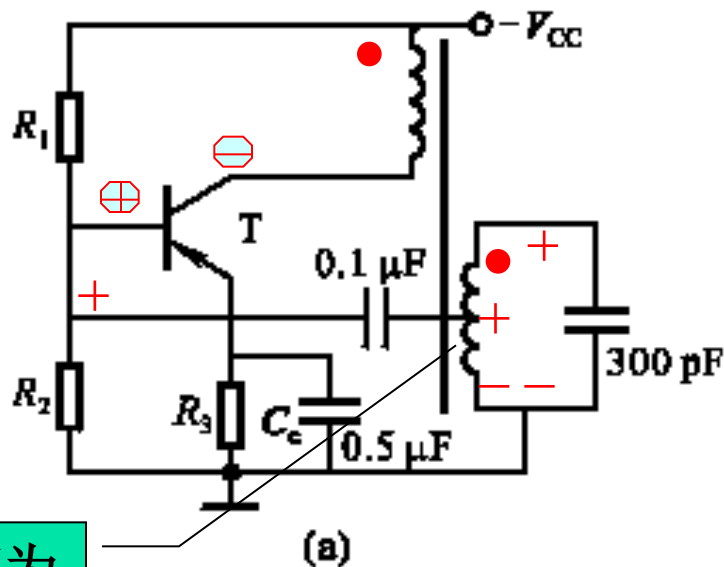
### 讨论三：改错，使电路有可能产生正弦波振荡



同名端对吗？  
放大电路能放大吗？  
各电容的作用？

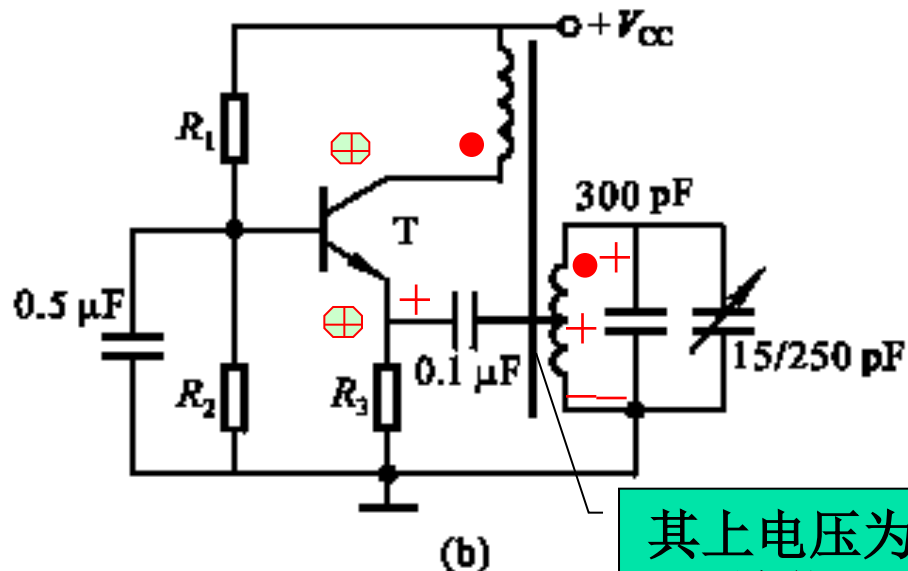


**例、**分别标出图示两个电路中变压器原、副边的同铭端，使电路满足正弦波振荡的相位条件。



其上电压为  
反馈信号

**解：**



其上电压为  
反馈信号

(a) 电路是共射放大电路，信号从基极注入。

(b) 电路是共基放大电路，信号从发射极注入。

## 5. 分类

振荡频率↑，与放大电路的参数有关

常用选频网络所用元件分类。

- 1)  $RC$ 正弦波振荡电路：1兆赫以下
- 2)  $LC$ 正弦波振荡电路：几百千赫~几百兆赫
- 3) 石英晶体正弦波振荡电路：振荡频率稳定

**RC桥式振荡：** $R$ 减小→同相比例运算电路的输出电阻将影响选频特性； $C$ 减小→极间电容和电路分布电容将影响选频特性

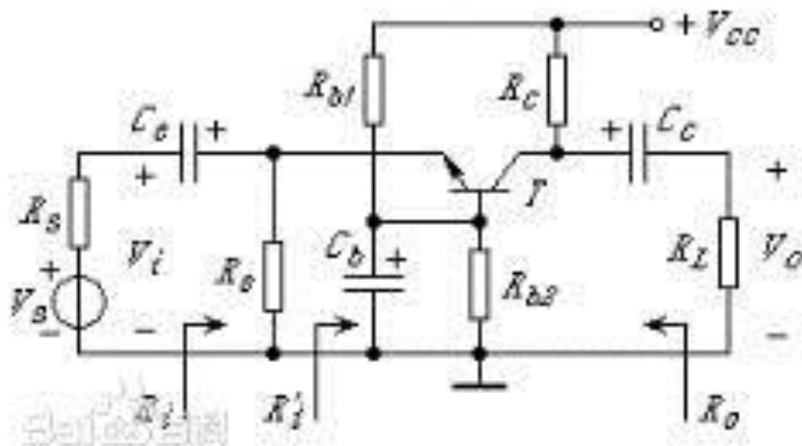
**LC振荡：**放大电路多采用分立元件电路，必要时还应采用共基电路

## 共基极放大电路具有以下特性

- 1、输入信号与输出信号同相；
- 2、电压增益高；
- 3、电流增益低 ( $\leq 1$ ) ；
- 4、功率增益高；
- 5、适用于高频电路。

为什么???

共基极放大电路的输入阻抗很小，会使输入信号严重衰减，不适合作为电压放大器。但它的频宽很大，因此通常用来做宽频或高频放大器。在某些场合，共基极放大电路也可以作为“电流缓冲器”（Current Buffer）使用。





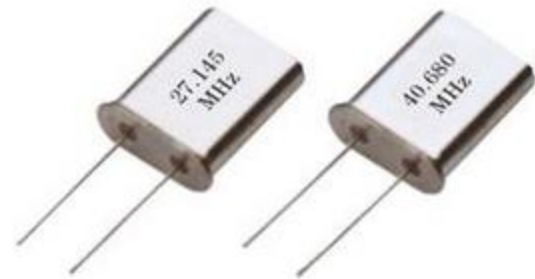
## 4.4 其它正弦波振荡器

### ■ 一、石英晶体振荡器

$\text{SiO}_2$  结晶体按一定方向切割的晶片。

压电效应和压电振荡：机械变形和电场的关系  
固有频率只决定于其几何尺寸，故非常稳定。

❖ 外形、结构、符号、等效电路

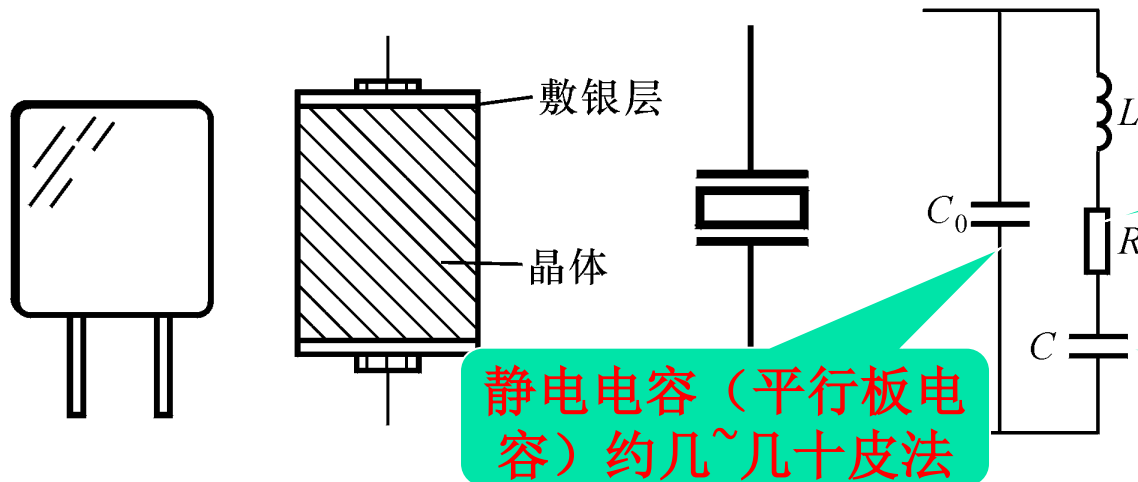


模拟晶体机械  
振动惯性  
 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{H}$

模拟机械振动摩擦  
损耗，很小

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{很大}$$

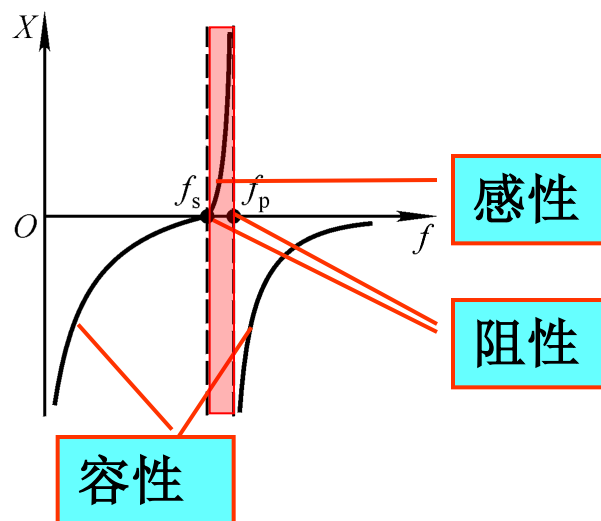
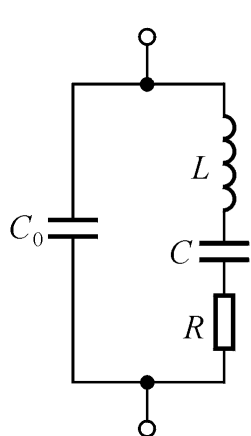
晶体弹性电容  
 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{pF}$



一般  $LC$  选频网络的  $Q$  为几百， $\Delta f/f$  为  $10^{-5}$ ；

石英晶体的  $Q$  可达  $10^4 \sim 10^6$ ， $\Delta f/f$  为  $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 。

# 1. 石英晶体的特点

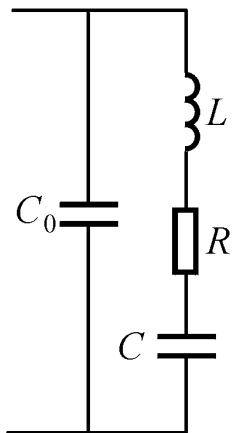


因  $C \ll C_0$ , 故

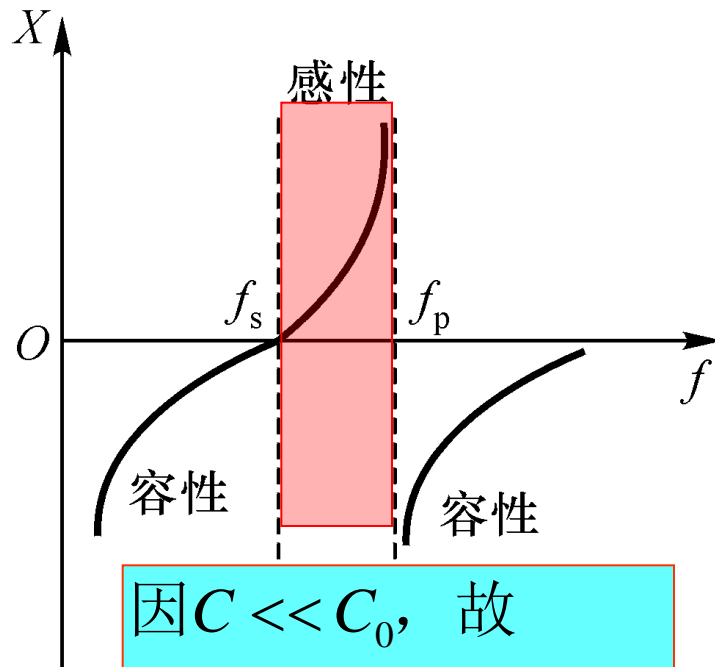
$$f_s \approx f_p \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

❖ 忽略R时的等效电抗

$$X = \frac{-\frac{1}{\omega C_0}(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{-\frac{1}{\omega C_0} + (\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\omega^2 LC - 1}{-\omega(C_0 - \omega^2 LC_0 C) - \omega C}$$



$$X = \frac{\omega^2 LC - 1}{-\omega(C_o - \omega^2 LC_o C) - \omega C}$$



因  $C \ll C_o$ , 故

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

### ❖ 晶体频率特性

✓ 当  $X = 0$  时, 产生串联谐振。

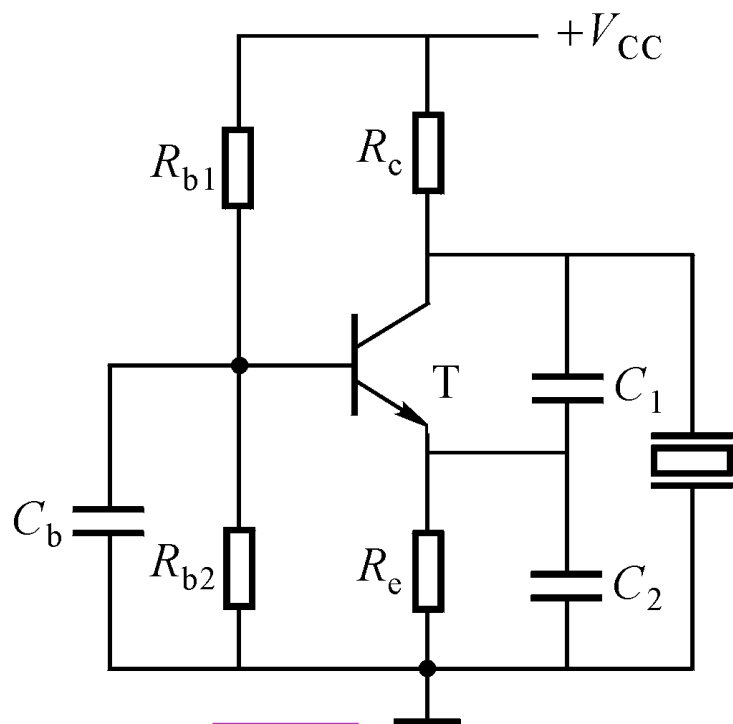
$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

✓ 当  $f > f_s$  时, LCR支路呈感性, 与  $C_o$  构成并联谐振。

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{CC_o}{C+C_o}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}\sqrt{\frac{C_o}{C+C_o}}} = f_s\sqrt{1+\frac{C}{C_o}} \approx f_s$$

## ❖ 石英晶体振荡器的基本形式

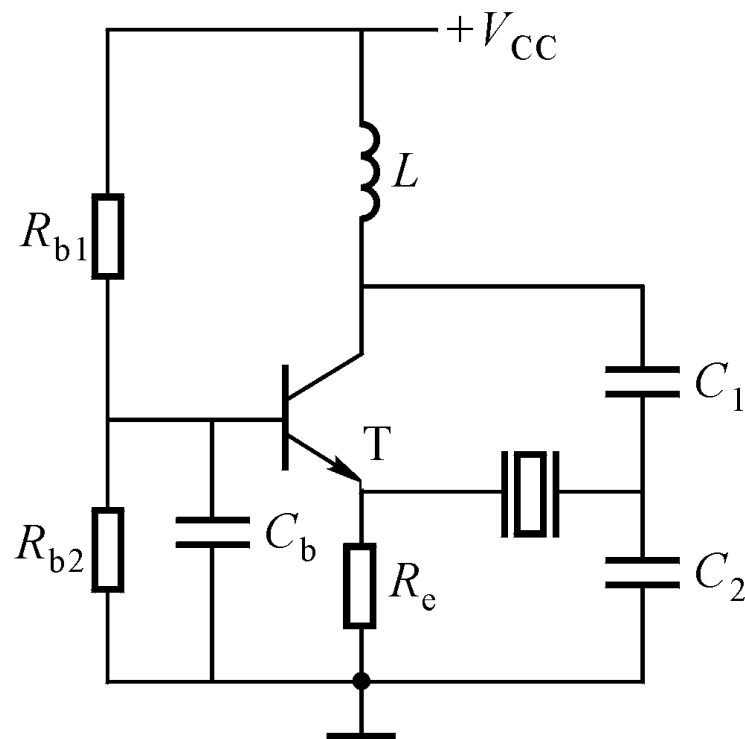
### ✓ 并联式



$$f_o = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C'}}$$

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

### ✓ 串联式

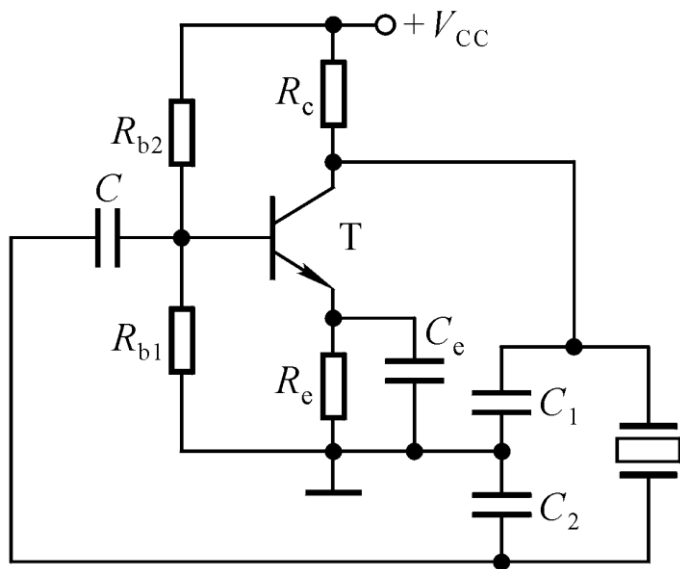


$$f_o = f_s$$

这时把振荡频率设计在  $f_s$ ，此时，晶体电抗为0，晶体接在正反馈支路，且反馈最强。

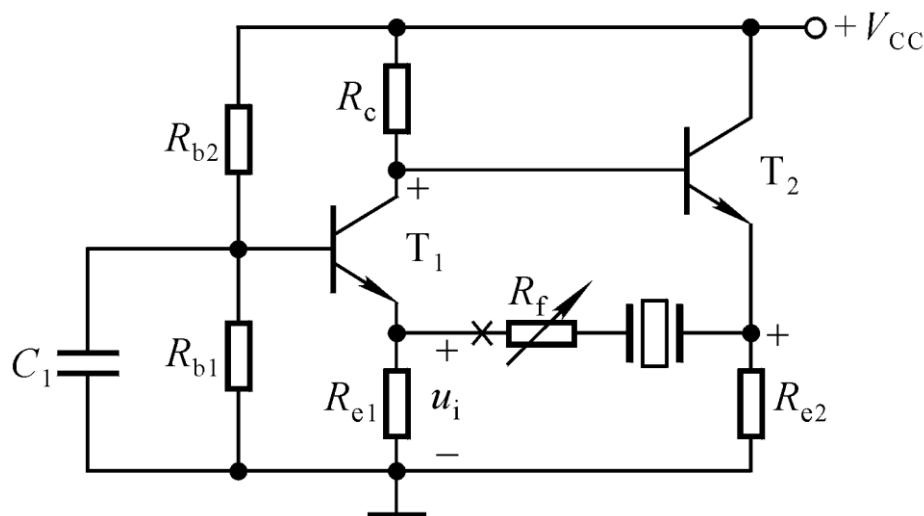
## 2. 电路

### (1) 并联型电路



- ① 石英晶体工作在哪个区？
- ② 是哪种典型的正弦波振荡电路？

### (2) 串联型电路



- ① 石英晶体工作在哪个区？
- ② 两级放大电路分别为哪种基本接法？
- ③  $R_f$ 的作用？  $C_1$ 的作用？

# 小结

- **1.** 正弦波振荡的基本条件
- **2.** ***RC***正弦振荡电路类型特点
- **3.** 变压器耦合正弦振荡电路
- **4.** 三点式***LC***正弦振荡电路
- **5.** 石英晶体正弦振荡电路
- 掌握振荡频率的计算
- 能否产生正弦振荡的判别

# 作业

■ 4.1, 2, 3, 5, 6, 7

■ 4.8, 9, 10, 11

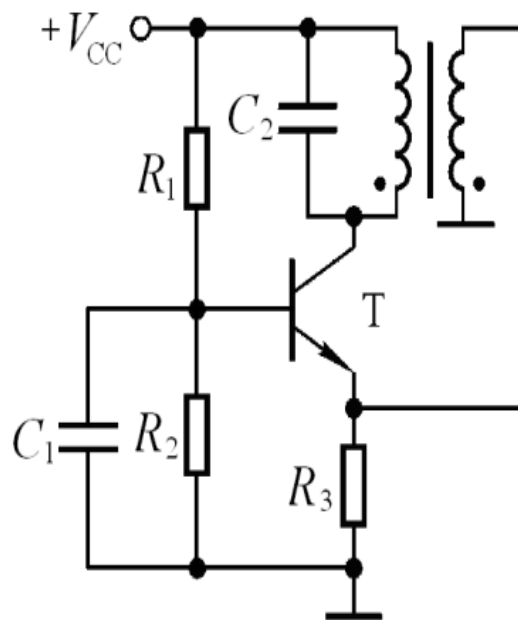
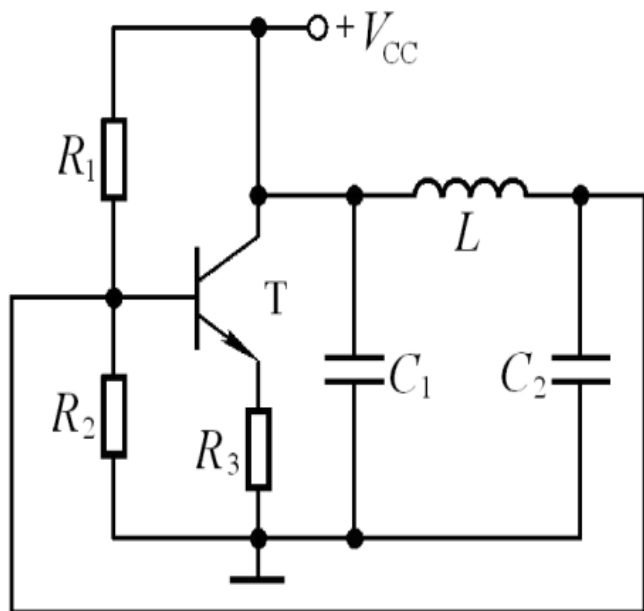
■ 4.12, 13, 14

正弦波发生

比较器

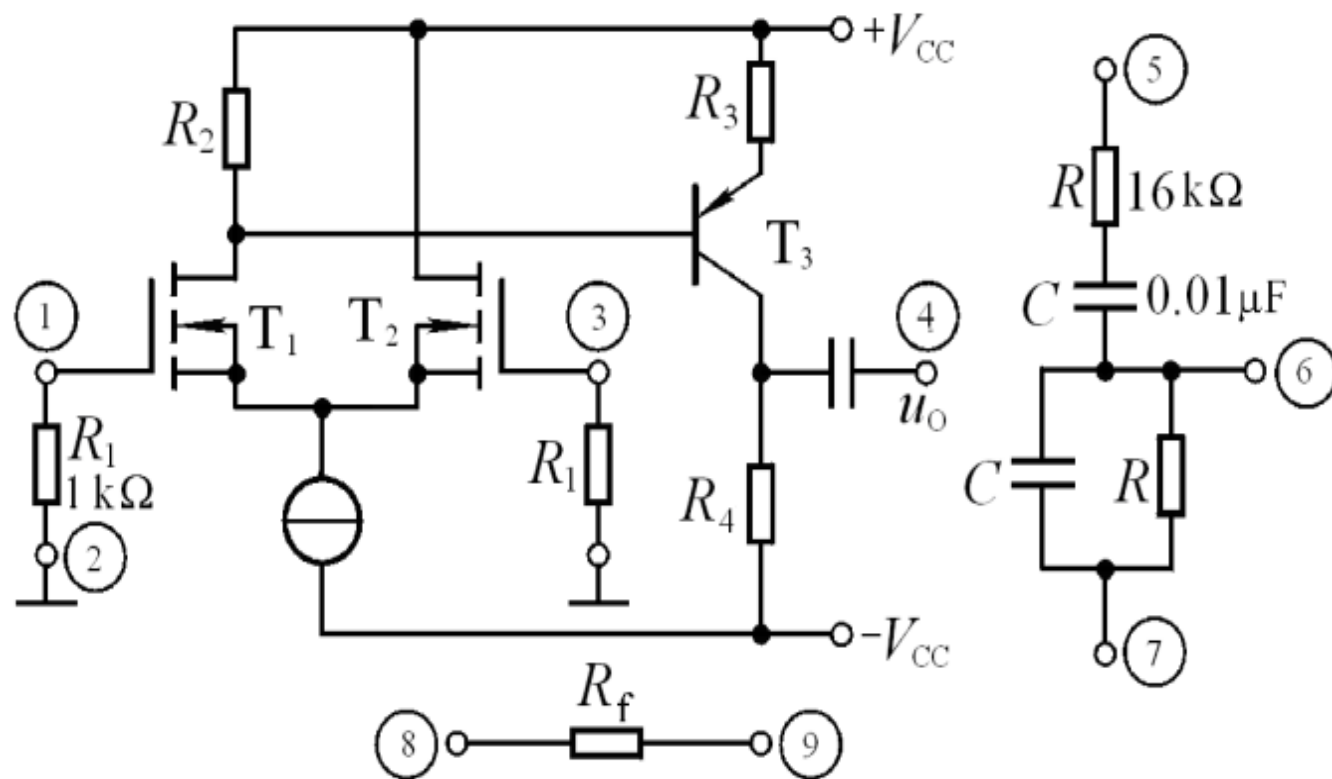
方波三角波

一、改错：改正图中所示各电路中的错误，使电路可能产生正弦波振荡。要求不能改变放大电路的基本接法（共射、共基、共集）。

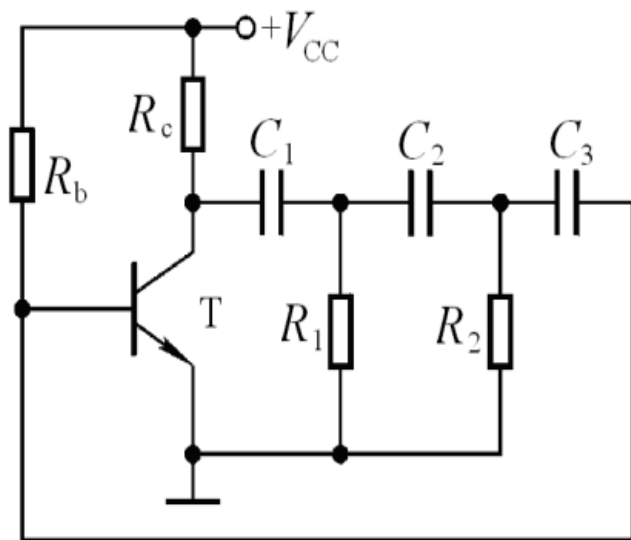




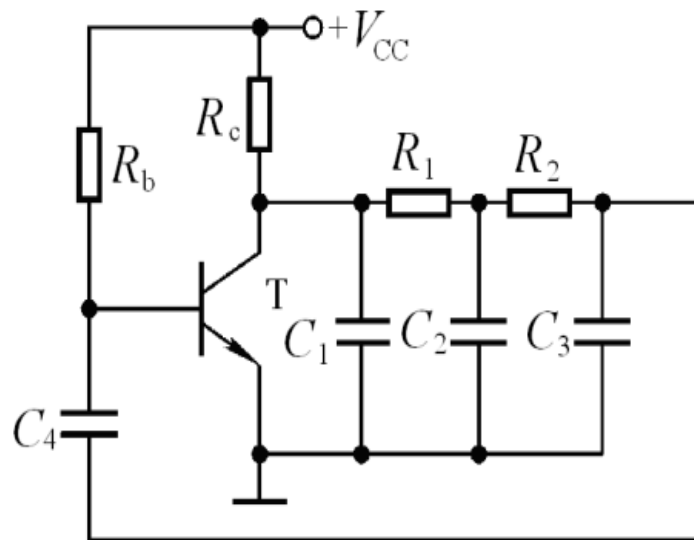
二、试将图中所示电路合理连线，组成RC桥式正弦波振荡电路。



判断图示各电路是否可能产生正弦波振荡，简述理由。设图(b)中 $C_4$ 容量远大于其它三个电容的容量。



(a)

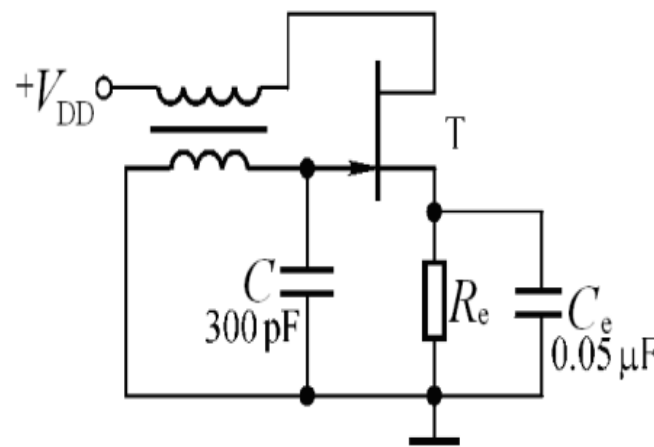
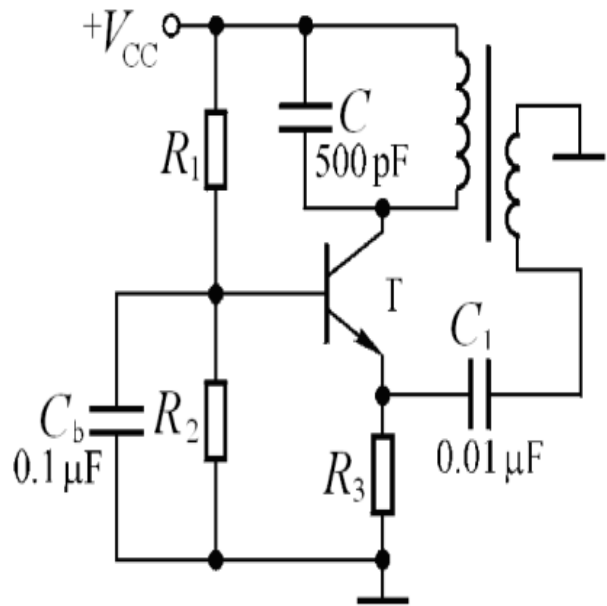
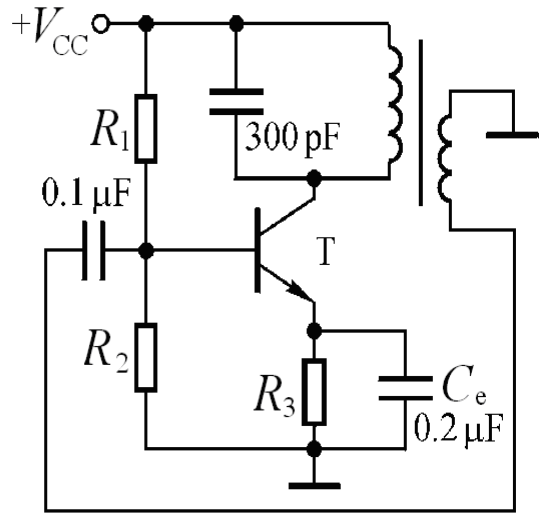
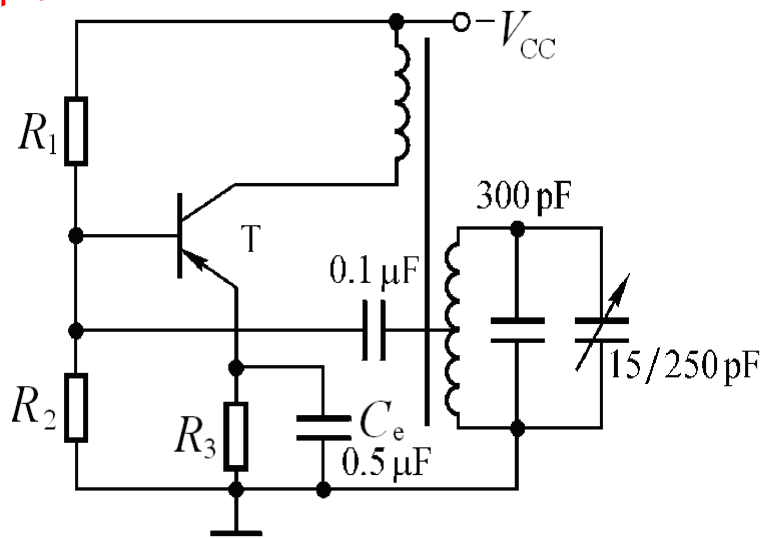


(b)

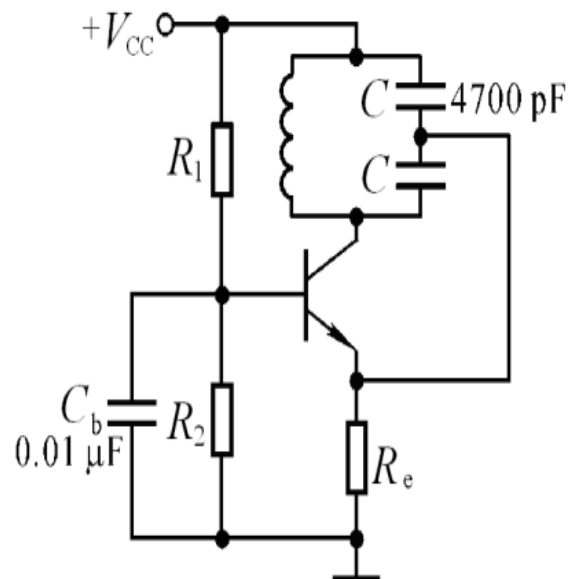
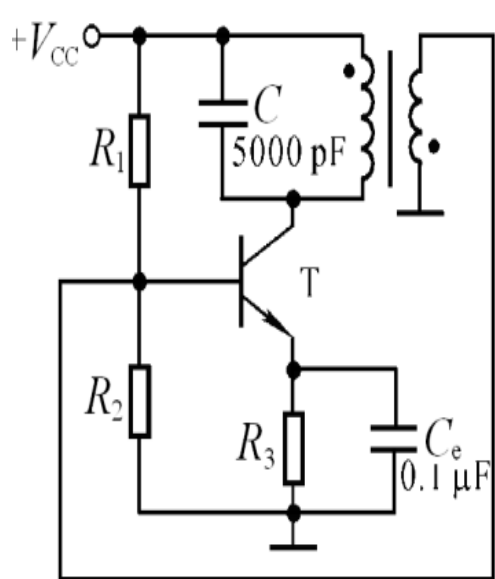
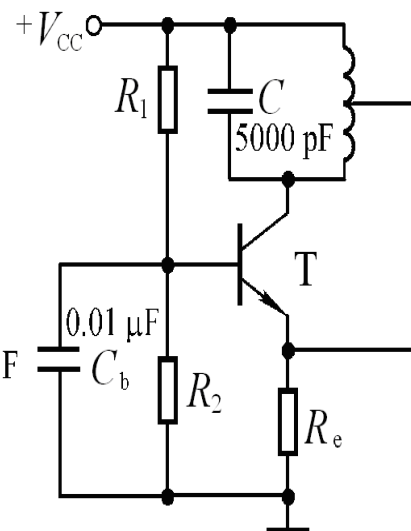
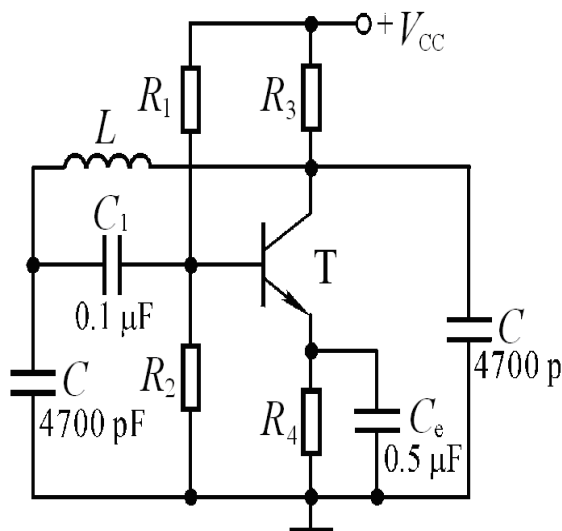
(1)若去掉两个电路中的 $R_2$ 和 $C_3$ ，则两个电路是否可能产生正弦波振荡？为什么？

(2)若在两个电路中再加一级 $RC$  电路，则两个电路是否可能产生正弦波振荡？为什么？

分别标出图示各电路中变压器的同名端，使之满足正弦波振荡的相位条件。



分别判断图示各电路是否可能产生正弦波振荡



试分别指出图示电路中的选频网络、正反馈网络和负反馈网络，并说明电路是否满足正弦波振荡的条件。

