

电路分析与电子技术基础

正弦波发生电路

(4.1 ~ 4.4)

n 正弦波发生电路

ü 半导体器件工作在线性放大区时，主要用来组成放大电路。

ü 在该工作区，还能用来组成产生正弦信号的振荡电路。

ü 正弦信号普遍存在，是一种用途十分广泛的信号。

ü 本章节，讨论用模拟电路产生正弦波的原理和方法，介绍各种电路，计算相关的电路参数。

ü 涉及内容：正反馈的应用。

Ø 正弦波发生电路

✓ 产生正弦振荡的条件 (4.1)

✓ RC 正弦波振荡器 (4.2)

✓ LC 正弦波振荡器 (4.3)

✓ 石英晶体振荡器 (4.4)

✓ 产生正弦振荡的条件

ü 正弦振荡器：

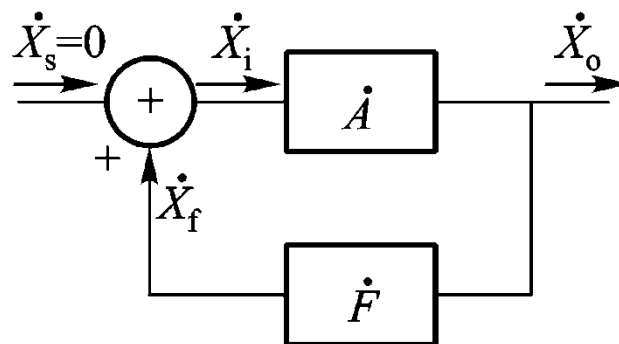
无需任何输入，即能产生稳定（幅度、频率）的正弦波输出。

ü 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。

ü 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。

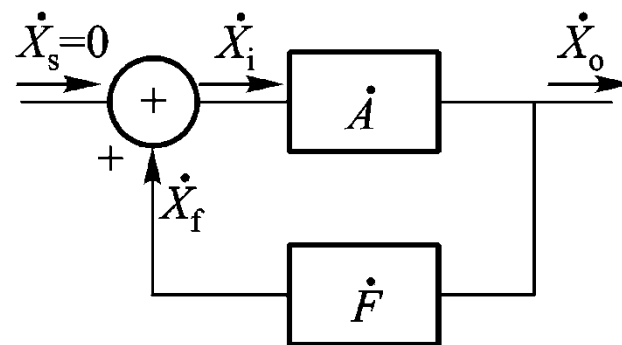


产生正弦振荡的条件

起振条件: $\begin{cases} |A F| > 1 \\ j_{AF} = j_A + j_F = \pm 2n\pi \end{cases}$ 稳定条件: $\begin{cases} |A F| = 1 \\ j_{AF} = j_A + j_F = \pm 2n\pi \end{cases}$

为能在无输入信号时也能振荡起来，应使电路的初始环路增益大于 1；
利用开启电源时的噪声，使净输入信号（反馈信号）不断增大；
最终产生振荡。

通常满足这两个条件时，电路一定振荡。



稳定的正弦波振荡还应该具备：

- (1) 选频网络：产生单一频率的正弦波；
- (2) 稳幅环节：产生稳定幅度（使环路增益自动达到 1）的正弦波。

✓ RC 正弦波振荡器

右图所示 RC 桥式正弦波振荡电路。

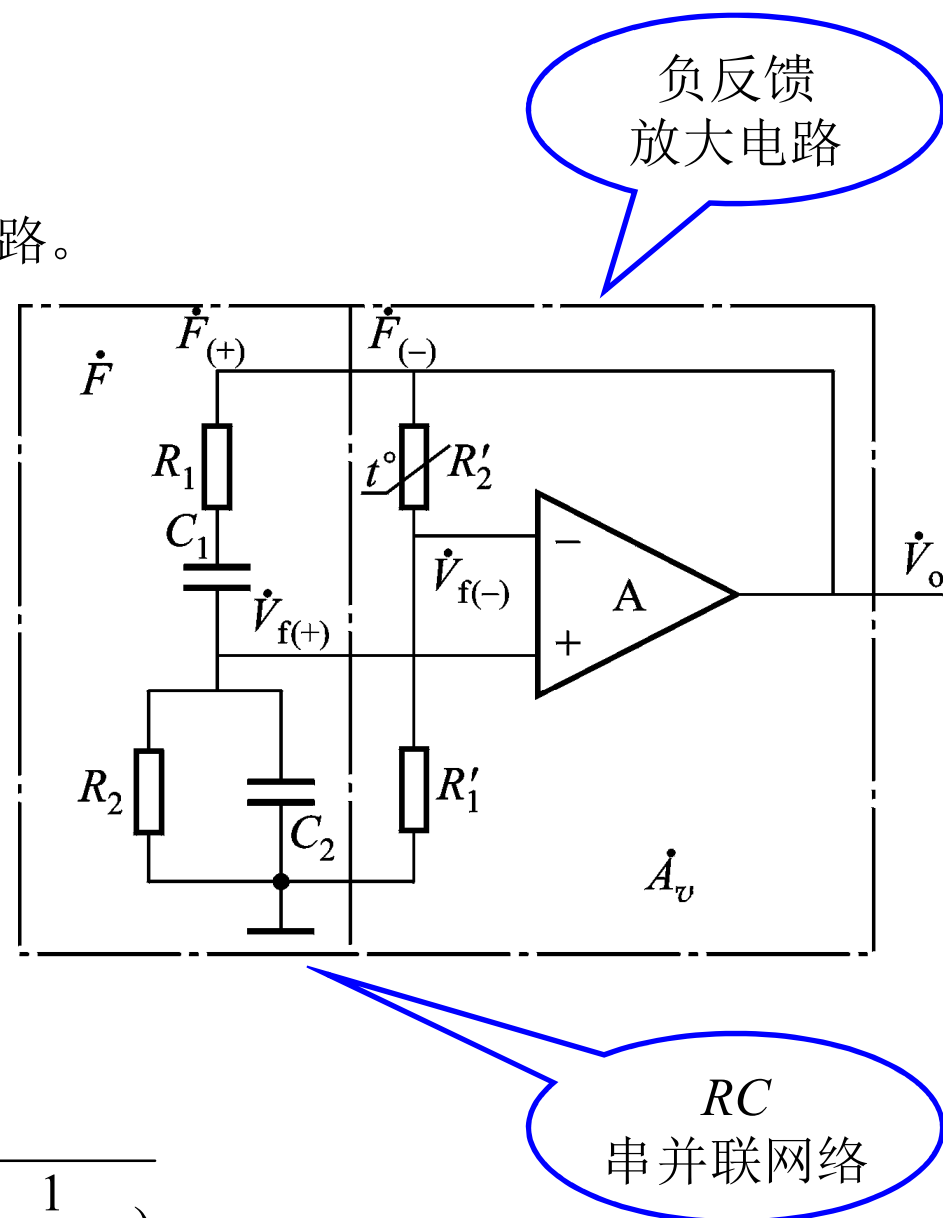
正反馈？

重点：RC 串并联网络

定义 R_1C_1 串联支路阻抗为 Z_1
 R_2C_2 并联支路阻抗为 Z_2

此网络的频率特性为：

$$\begin{aligned} \dot{I}_{f(+)} &= \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}\right) + j(\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1})} \end{aligned}$$



⌘ RC 正弦波振荡器 (RC 串并联网络频率特性)

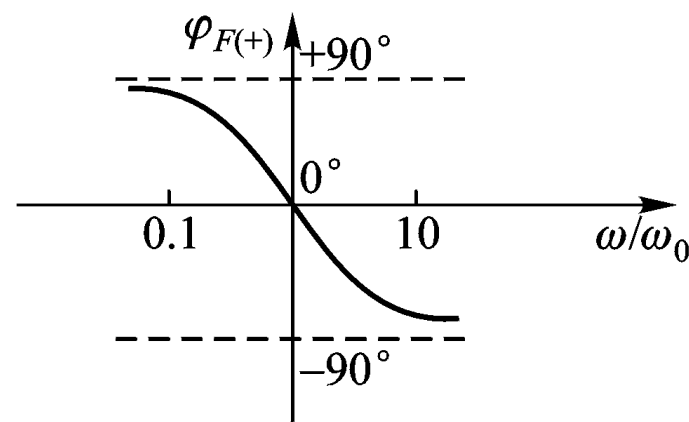
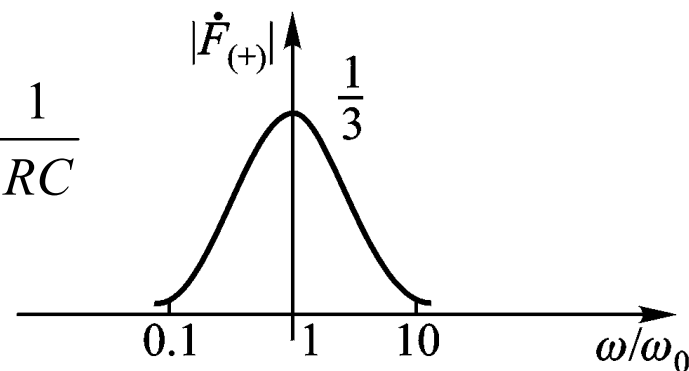
令: $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$, $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

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

幅频表达式: $|\dot{F}_{(+)}| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}}$

相频表达式: $\angle \dot{F}_{(+)} = -\tan^{-1}(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0})$

$$\dot{F}_{(+)} = \frac{1}{(1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}) + j(\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1})}$$



⌘ RC 正弦波振荡器 (RC 串并联网络选频特性)

ü 选频特性

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时:

由幅频特性图: $|F_{(+)}|_{\max} = \frac{1}{3}$

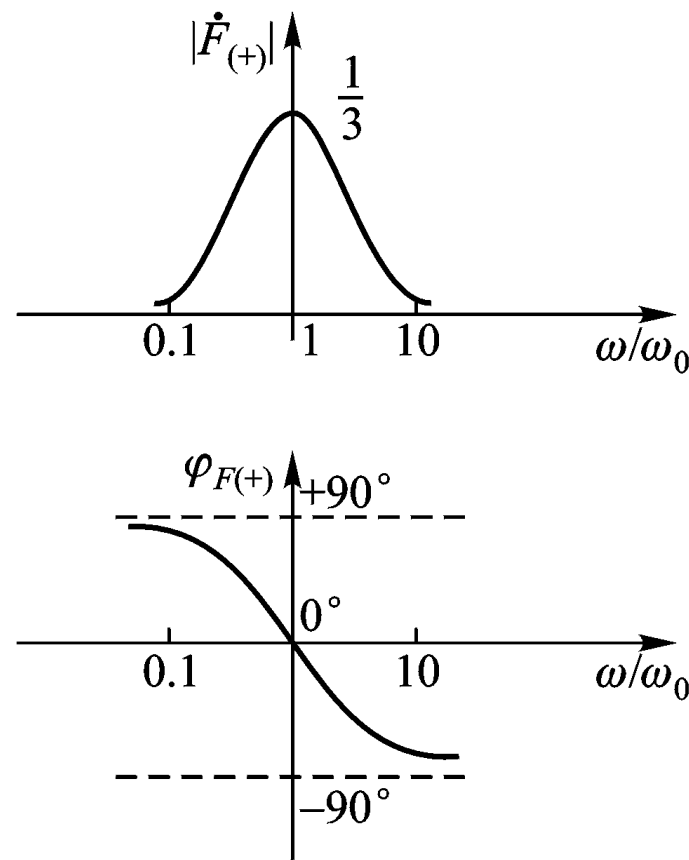
说明: 此时电路的反馈效果最强。

由相频特性图: $\angle F_{(+)} = 0^\circ$

说明: 此时电路为同相输出。

由于整体的相移范围为 $\pm 90^\circ$, 所以只有此时才有可能正反馈, 且反馈效果最强。

(能产生单一频率的振荡)



原因?

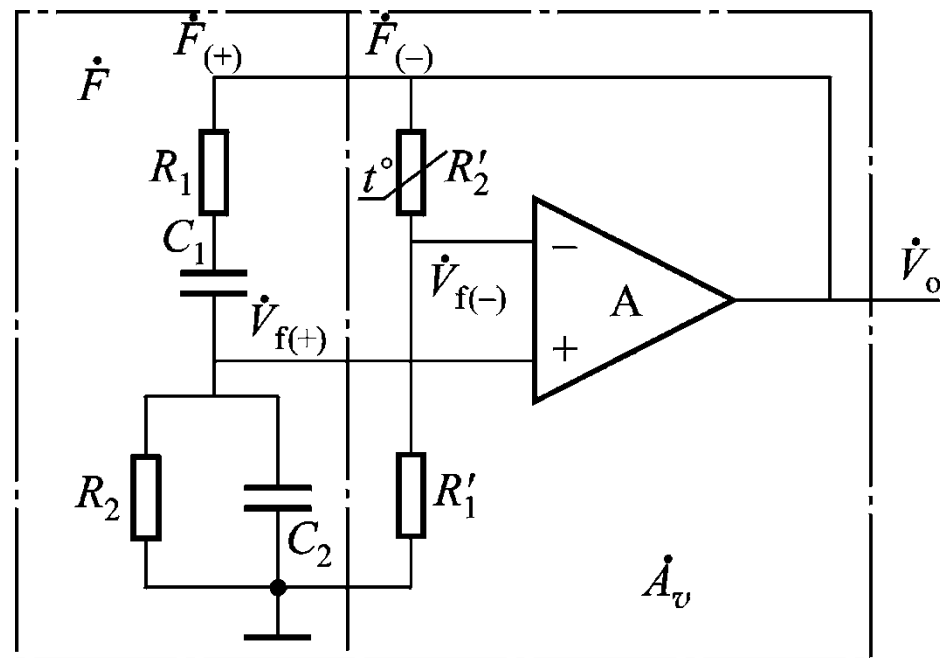
Ø RC 正弦波振荡器（RC 桥式电路起振条件）

ü 选频特性

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时：

$$|\dot{F}_{(+)}|_{\max} = \frac{1}{3}, \quad \angle \dot{F}_{(+)} = 0^\circ$$

$$|\dot{A}_v| = 1 + \frac{R'_2}{R'_1}, \quad \angle \dot{A}_v = 0^\circ$$



ü 起振条件： $|\dot{A}_v| > 3$

（可通过调节负反馈网络的两个电阻实现）

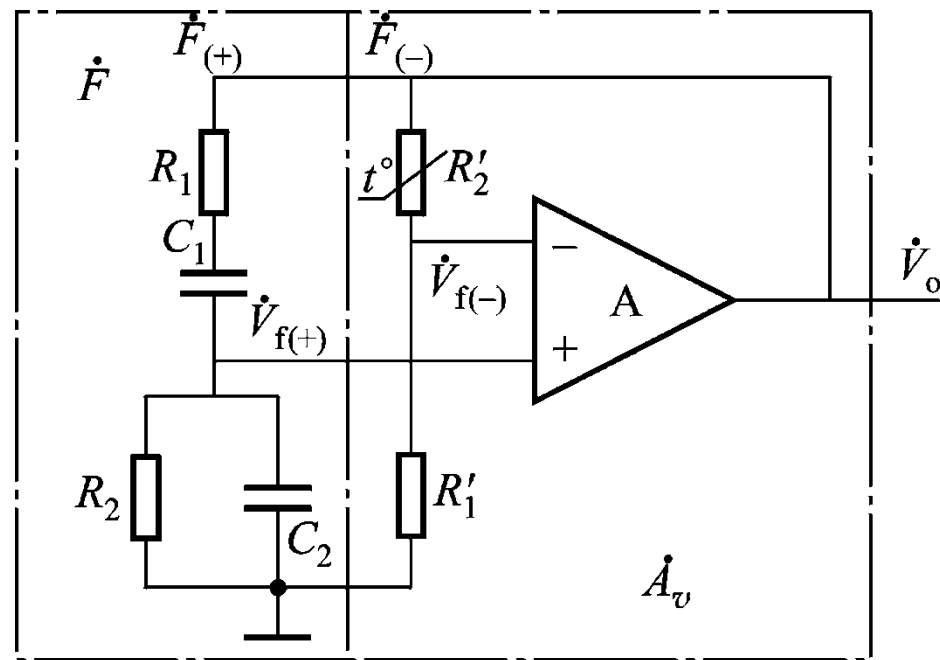
ü 振荡频率： $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$

Ø RC 正弦波振荡器（RC 桥式电路稳幅环节）

ü 起振后，若无稳幅措施，
 则输出幅度会越来越大；
 最终出现非线性失真；
 （饱和/截止失真）
 ... → 停振 → 慢慢起振 → ...

ü 稳幅环节： $\frac{\Delta \dot{A}_v}{\Delta v_o}$ 或 $\frac{\Delta \dot{F}^{(+)}}{\Delta v_o} < 0$

使环路增益自动保持在 1。



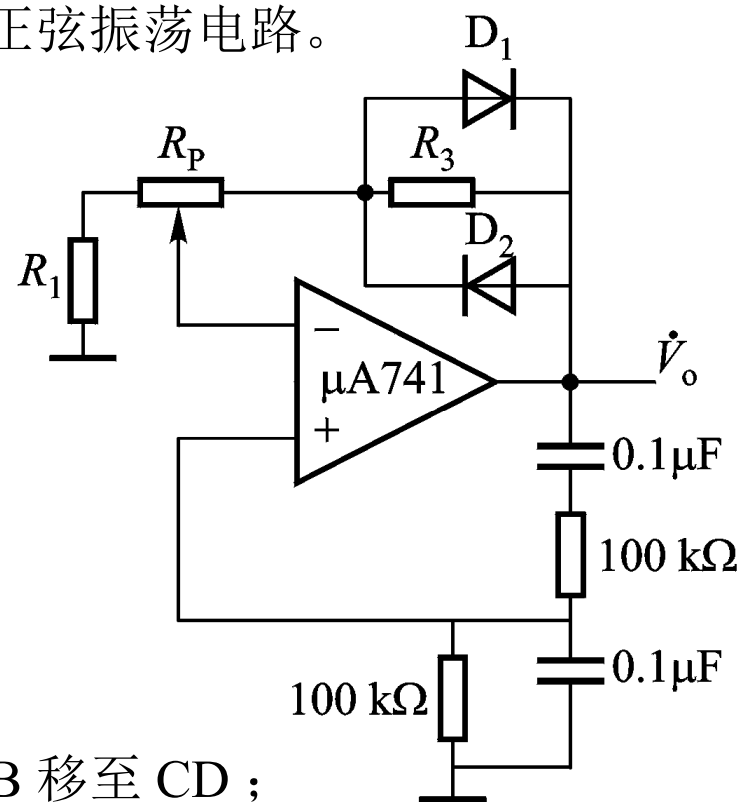
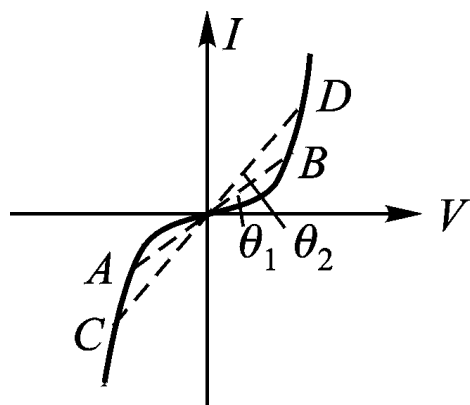
ü 正温度系数热敏电阻代替 R'_1 ；
 负温度系数热敏电阻代替 R'_2 。

$$\dot{A}_v = 1 + \frac{R'_2}{R'_1}$$

Ø RC 正弦波振荡器（自动稳幅环节例）

ü 右图所示用二极管实现自动稳幅的 RC 正弦振荡电路。

ü 二极管伏安特性（下图）



振荡幅度增加时，二极管的工作点将由 AB 移至 CD ；

对应的二极管等效电阻下降。

$$A_v = 1 + \frac{R_3 // R_D + R_{P3}}{R_1 + R_{P1}}$$

Ø RC 正弦波振荡器（振荡判断）

ü 检查直流通路是否合理。

ü 检查交流通路是否合理。

ü 判断是否满足正弦振荡的幅度条件。

（幅度条件：环路增益是否能大于 1 ）

ü 利用瞬时极性法，判断是否满足正弦振荡的相位条件。

（相位条件：环路增益的相位是否为 180° 的偶数倍）

关键：如何确定原信号的输入点；

方法：以反馈输出至放大器的端点，作为原信号的输入点（注入点）。

【例3.1-1】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡。

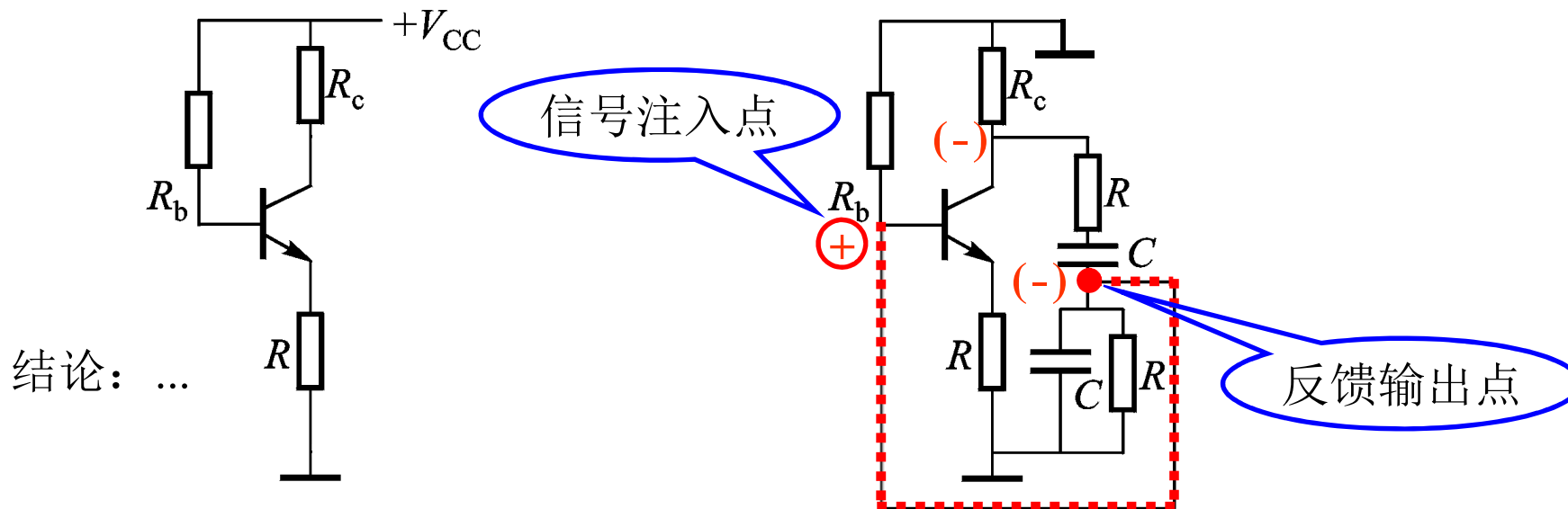
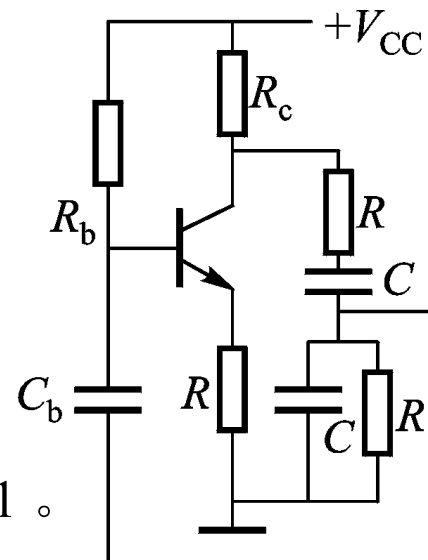
解：画出直流通路如下左图所示，判断合理。

画出交流通路如下右图所示。

由于放大器环节为 CE 组态，所以环路增益能大于 1。

根据图中所作的瞬时极性：

由于反馈输出点极性与信号注入点极性相反，所以相位条件不满足。



结论： ...

【例3.1-2】

右图电路。

调整电路，使能产生正弦振荡。

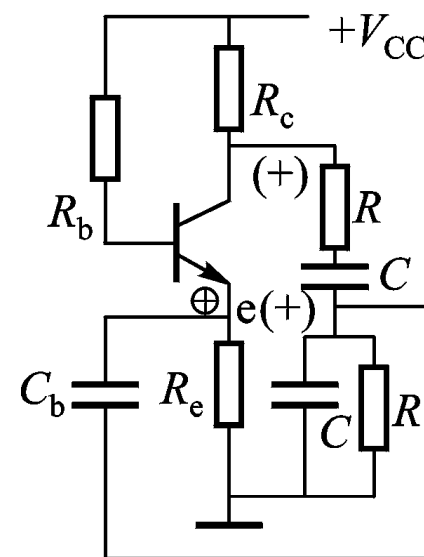
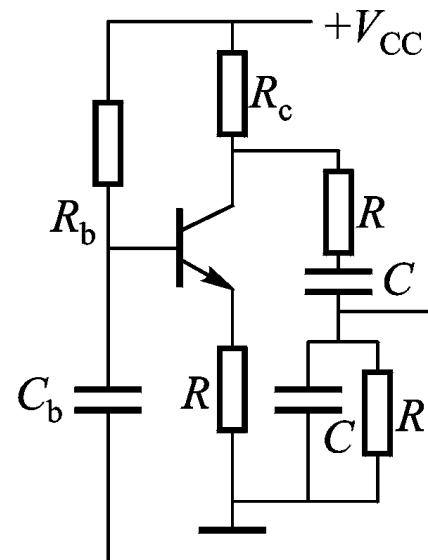
解：将放大器环节调整为 CB 组态。

理论上，能满足幅度、相位条件。

实际中，由于 CB 组态的输入电阻较小，
将影响 RC 串并联电路的参数，导致无法振荡。

（这个实际情况分析，供参考，不作解题要求）

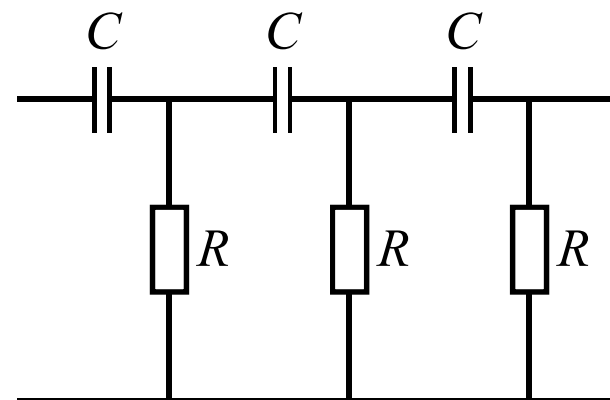
将放大器环节调整为 CC 组态？



Ø RC 正弦波振荡器（其它类型）

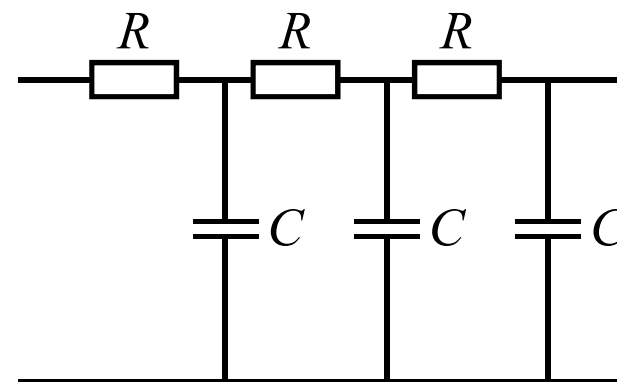
Ü 超前移相式 RC 网络。

（相移范围 $0 \sim 270^\circ$ ，选频点 180° ）



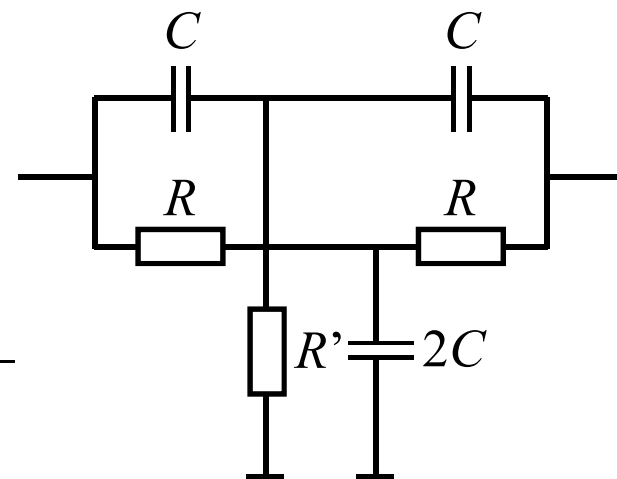
Ü 滞后移相式 RC 网络。

（相移范围 $-270 \sim 0^\circ$ ，选频点 -180° ）



Ü 双 T 型选频网络。

（相移范围随 R' 变化 ...）

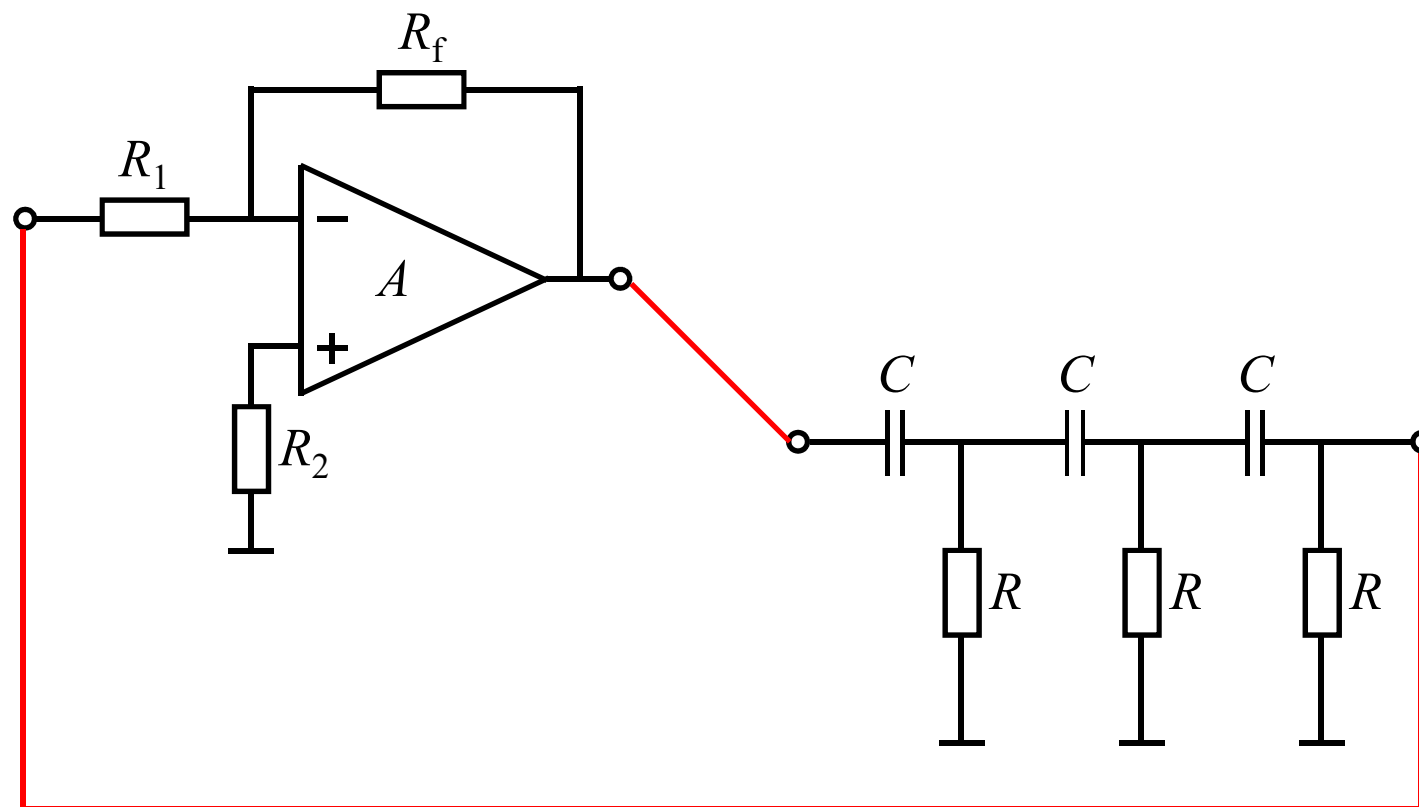


RC 正弦振荡一般适于低频（ $1\text{ Hz} \sim 1\text{ MHz}$ ）

【例3.2】

下图电路。

连接电路，使能产生正弦振荡。



✓ LC 正弦波振荡器

ü 以 LC 并联谐振回路作为选频网络，振荡频率即为谐振频率。

ü 振荡频率一般在几百千赫（高频）以上。

ü 常见方式：变压器反馈式、电容三点式、电感三点式。

Ø LC 并联谐振回路

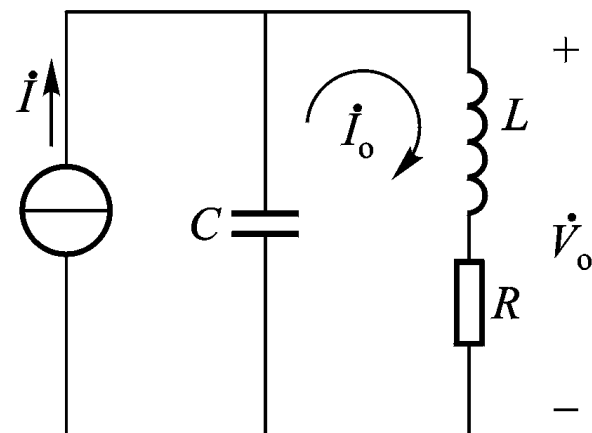
ü 右图所示 LC 并联网络。

ü 等效阻抗:
$$Z = \frac{1}{j\omega C} \parallel (R + j\omega L)$$
$$= \frac{L/C}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

ü 谐振频率: $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

(此时回路呈纯阻特性, 且阻抗最大)

谐振阻抗: $Z = Z_{0\max} = \frac{L}{RC}$



Ø LC 并联谐振回路（选频特性）

ü 右图所示 LC 并联网络。

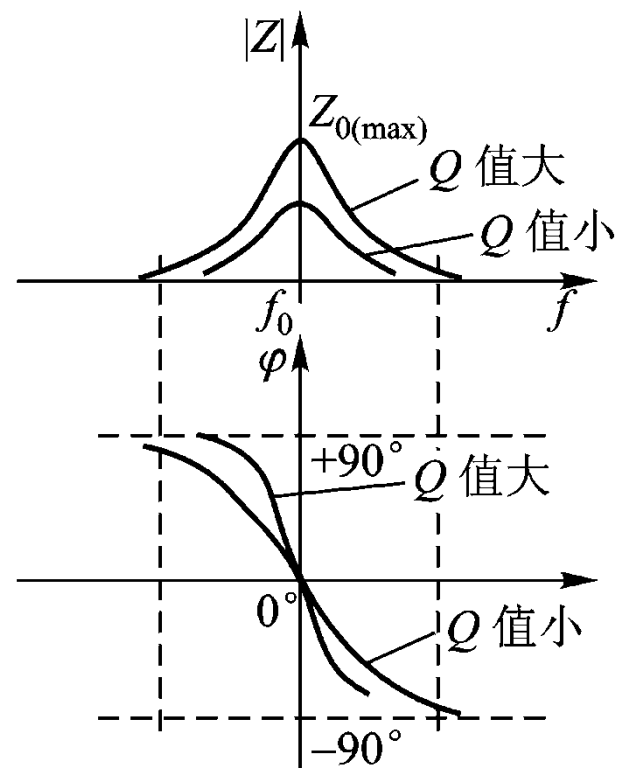
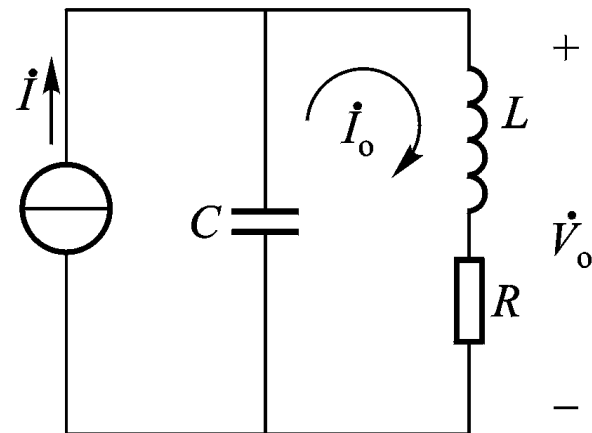
ü 频率特性图（右）

品质因数： $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$
（选频特性）

ü 谐振频率： $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

（此时回路呈纯阻特性，且阻抗最大）

谐振阻抗： $Z = Z_{0\max} = \frac{L}{RC}$



Ø LC 正弦波振荡器（振荡判断）

与 RC 正弦波振荡器的振荡判断方法一致

ü 检查直流通路是否合理。

由于电感在直流通路中当做短路处理，所以有可能改变原直流通路。

ü 检查交流通路是否合理。

ü 判断是否满足正弦振荡的幅度条件。

由于 LC 并联谐振回路的谐振阻抗可以很大，所以一般能满足幅度条件。

ü 利用瞬时极性法，判断是否满足正弦振荡的相位条件（信号注入点）。

ü 由于 LC 并联谐振回路的谐振电流比外电路电流大得多，所以可以略去外电路的参数影响。

【例3.3-1】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡。

解：画出直流通路如下右图所示。

判断合理（ C_b 不可被取消）。

画出交流通路（略， C 不可被短路）。

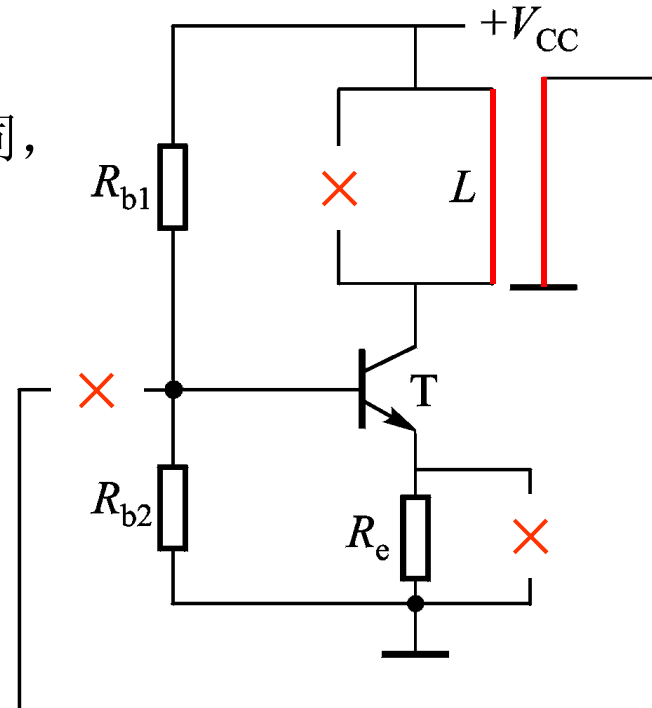
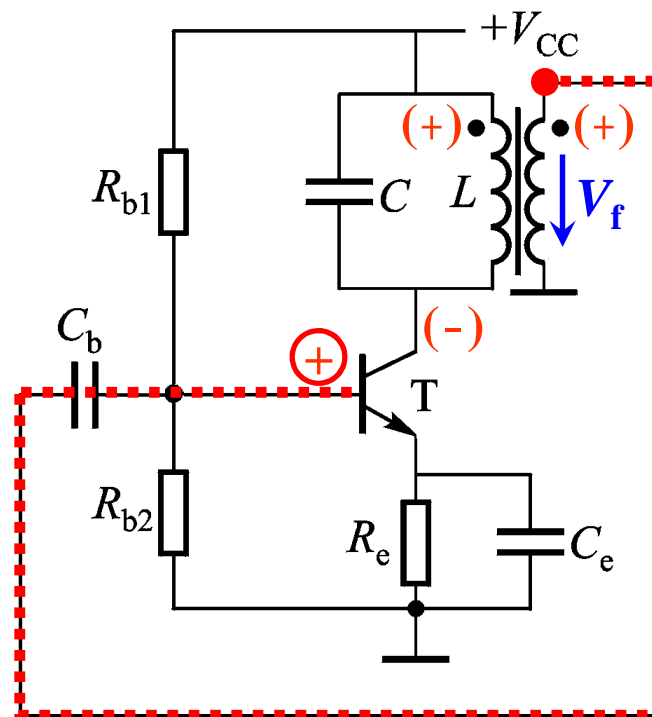
（ LC 电路，默认环路增益能大于 1）

根据图中所作的瞬时极性：

由于反馈输出点极性与信号注入点极性相同，
所以相位条件满足。

结论： ...

变压器反馈式 LC 正弦振荡电路



【例3.3-2】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡。

解：画出直流通路如下右图所示。

判断合理。

画出交流通路（略， C 不可被短路）。

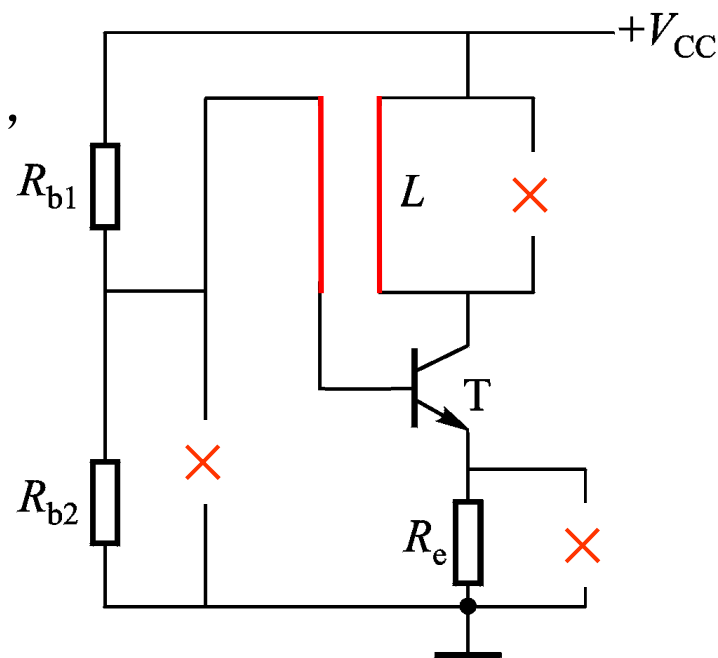
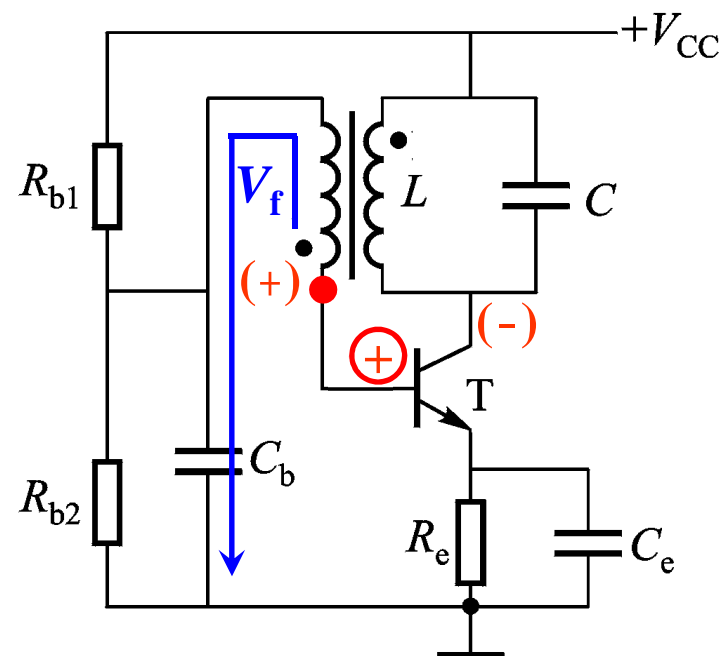
（ LC 电路，默认环路增益能大于 1）

根据图中所作的瞬时极性：

由于反馈输出点极性与信号注入点极性相同，
所以相位条件满足。

结论： ...

变压器反馈式 LC 正弦振荡电路



【例3.3-3】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡。

解：画出直流通路如下右图所示。

判断合理（ C_e 不可被取消）。

画出交流通路（略， C 不可被短路）。

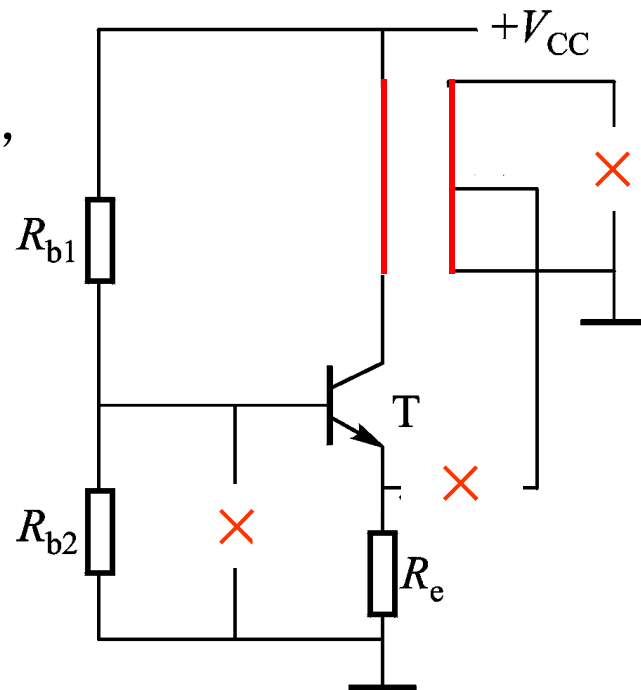
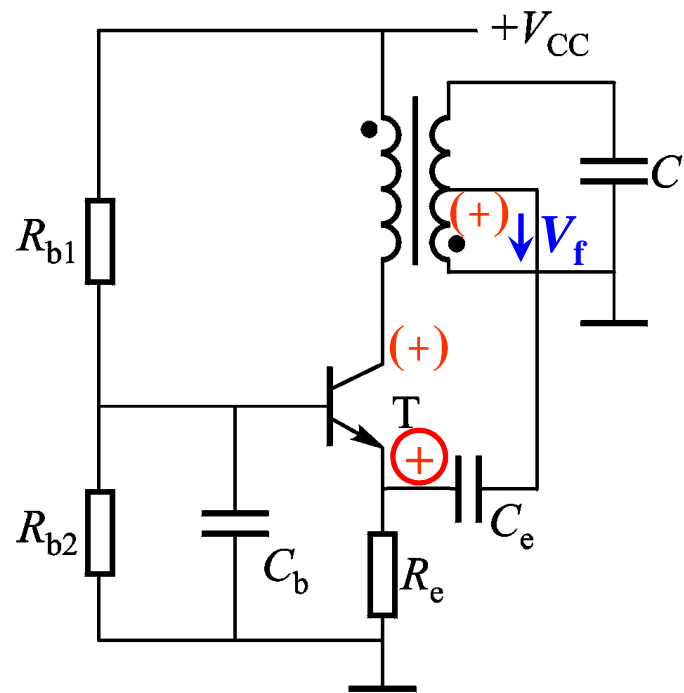
（ LC 电路，默认环路增益能大于 1）

根据图中所作的瞬时极性：

由于反馈输出点极性与信号注入点极性相同，
所以相位条件满足。

结论： ...

变压器反馈式 LC 正弦振荡电路



Ø LC 正弦波振荡器（三点式）

ü 三点式：

LC 并联谐振电路的三个端口分别与放大器的三个端口相连。

（放大器的三个端口：反馈、输出、公共端）。

ü LC 并联谐振电路内部（三个端口）：

电感三点式：两个电感 + 一个电容；

电容三点式：一个电感 + 两个电容。

ü LC 并联谐振电路对外：

两条支路（电感、电容）组成并联谐振。

（支路与地无关）

Ø LC 正弦波振荡器（三点式分析）

采用 LC 正弦波振荡器的通用振荡判断方法

ü 关键：找到反馈端，并求得反馈信号的瞬时极性。

ü 振荡频率：

$$\text{电感三点式: } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}$$

$$\text{电容三点式: } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

【例3.4-1】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡，并求振荡频率。

解：画出直流通路（略）。

判断合理（ C_c 、 C_b 不可被取消）。

画出交流通路（略， C 不可被短路）。

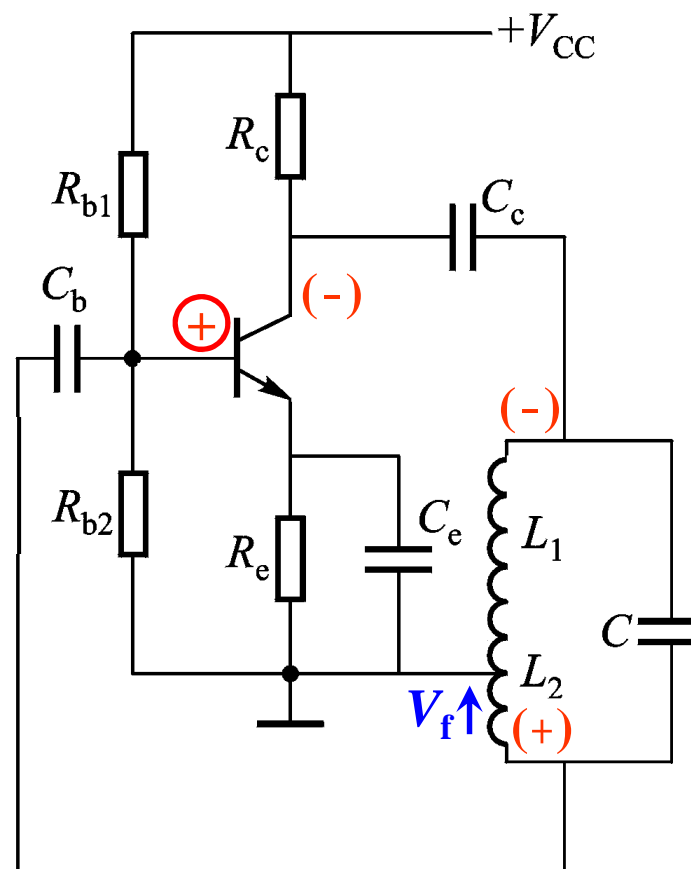
（ LC 电路，默认环路增益能大于 1）

找到反馈点 ...

根据图中所作的瞬时极性：

由于反馈点极性与信号注入点极性相同，
所以相位条件满足。

结论： ...



电感三点式 LC 正弦振荡电路
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}$$

【例3.4-2】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡，并求振荡频率。

解：画出直流通路（略）。

判断合理。

画出交流通路（略， C_1 、 C_2 不可被短路）。

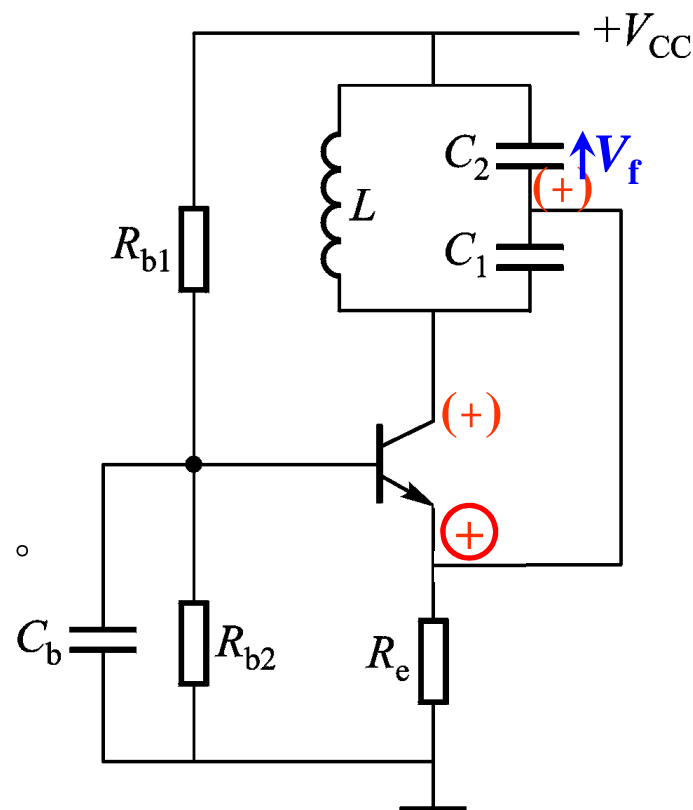
（ LC 电路，默认环路增益能大于 1）

找到反馈点 ...

根据图中所作的瞬时极性：

由于反馈点极性与信号注入点极性相同，
所以相位条件满足。

结论： ...



电容三点式 LC 正弦振荡电路
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}$$

Ø LC 正弦波振荡器（三点式分析）

采用 LC 正弦波振荡器的通用振荡判断方法

ü 关键：找到反馈端，并求得反馈信号的瞬时极性。

ü 技巧：

支路两端口间极性相反；

支路内部各器件极性顺支路端口极性。

Ø LC 正弦波振荡器（实用特点）

ü 电感三点式电路容易起振，但波形不好；

电容三点式电路由于反馈信号取自电容两端（不含高次谐波），所以波形好，缺点是不容易起振。

ü LC 正弦波振荡器的幅度条件一般较易满足；

若不满足，可采用一些辅助措施（参教材 P200）。

ü 选用高质量的电感和电容，提高谐振回路 Q 值，能稳定振荡频率；
在高频率稳定要求场合，可用石英晶体振荡器。

【例3.4-3】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡，并求振荡频率。

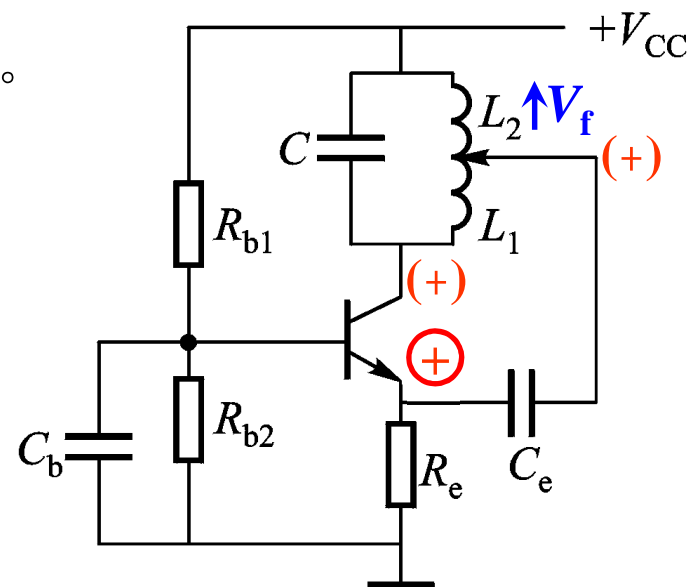
解：

直流通路合理（ C_e 不可被取消）。

默认环路增益能大于 1；

找到反馈点 ...

根据图中作瞬时极性，相位满足。



电感三点式 LC 正弦振荡电路：
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}$$

【例3.4-4】

右图电路。

判断：是否能产生正弦振荡，并求振荡频率。

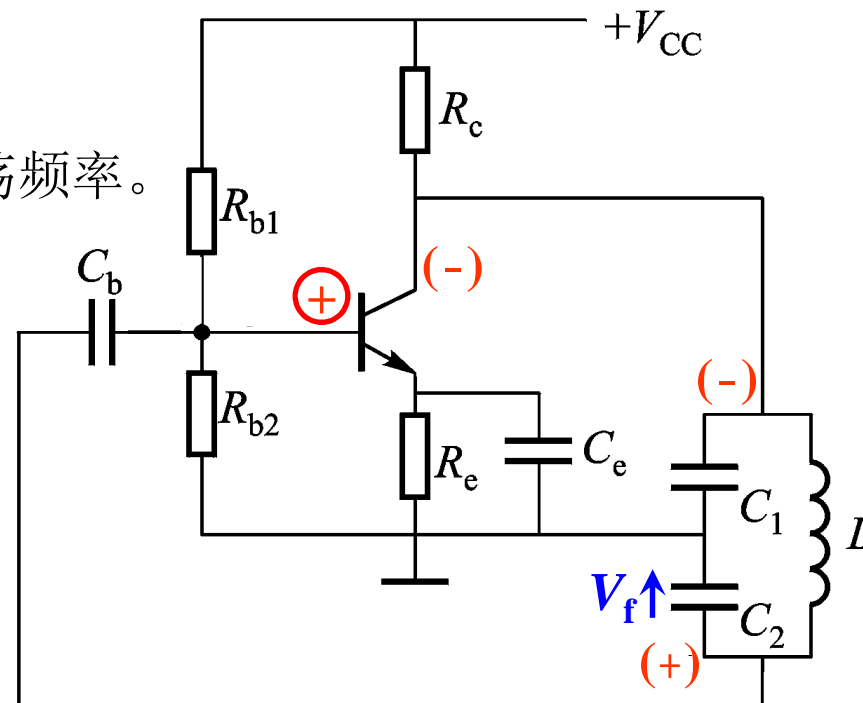
解：

直流通路合理（ C_b 不可被取消）。

默认环路增益能大于 1；

找到反馈点 ...

根据图中作瞬时极性，相位满足。



电容三点式 LC 正弦振荡电路：
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}$$

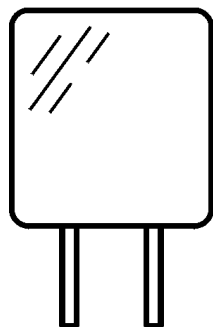
✓ 石英晶体振荡器

✎ 石英晶体振荡器：一种谐振器件。

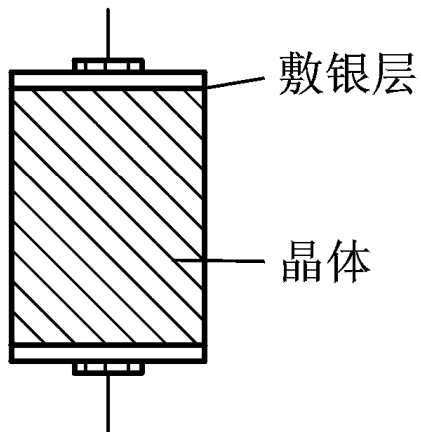
利用 SiO_2 结晶体压电效应原理制成，品质因数 Q 很大。

✎

外形



结构

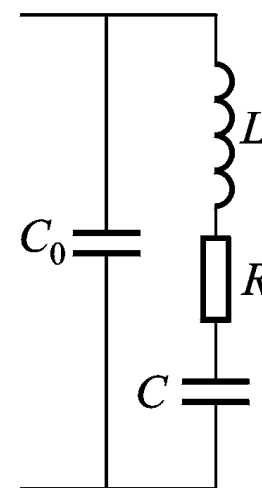


符号



✎ 等效电路

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



石英晶体振荡器（频率特性）

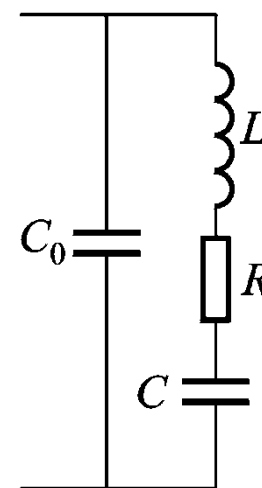
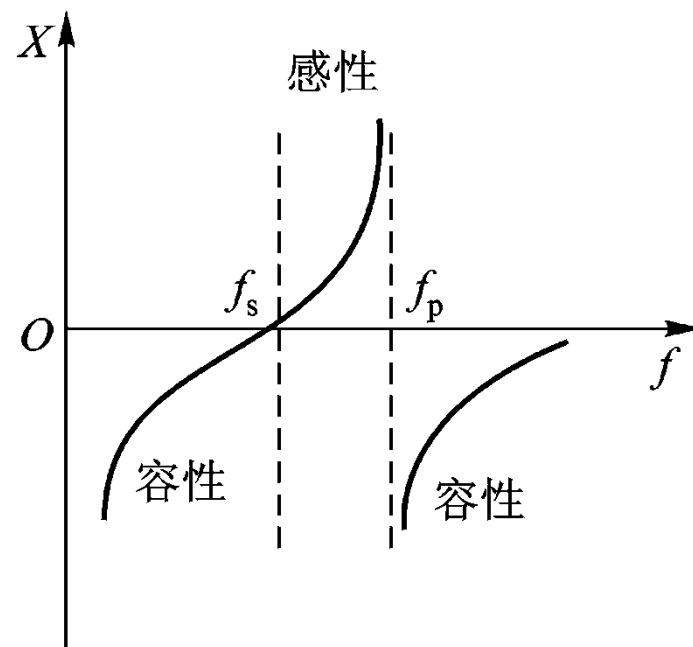
当 $X=0$ 时，产生串联谐振。

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

当 $f > f_s$ 时， LCR 支路呈感性。
（与 C_0 构成并联谐振）

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

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



Ø 石英晶体振荡器（应用电路）

Ü 并联式

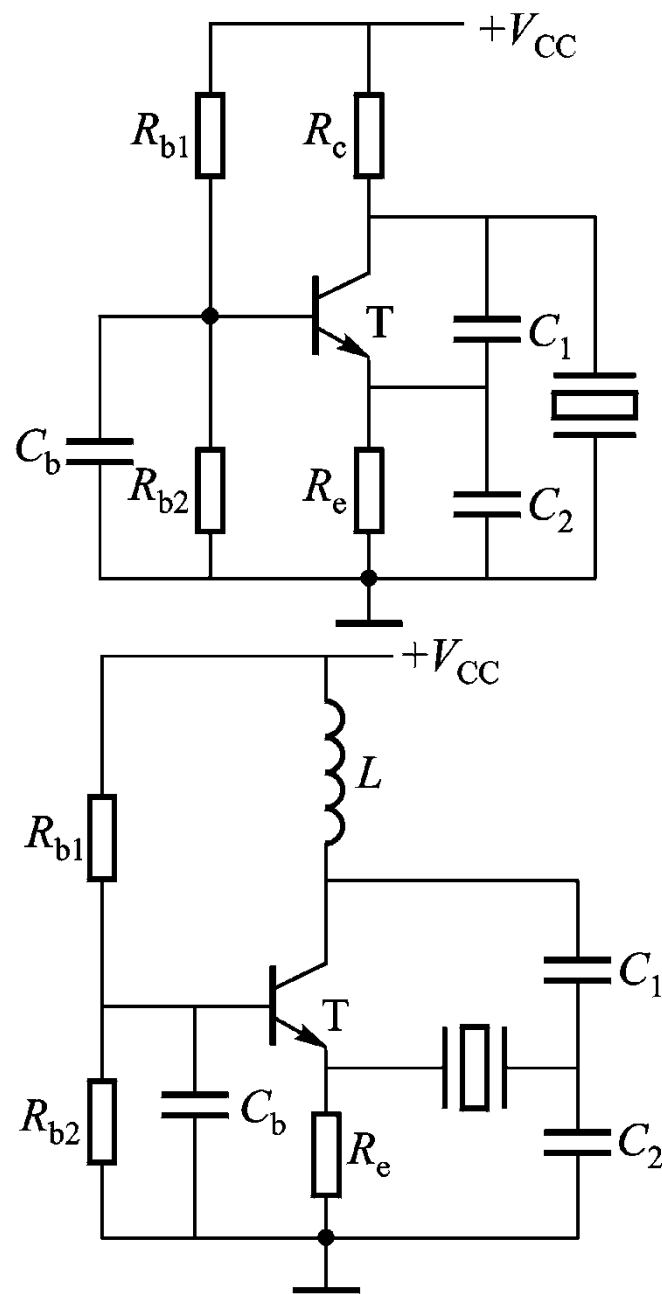
$$f_0 = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C'}} \quad , \quad (C' = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_0)$$

Ü 串联式

$$f_0 = f_s$$

此时，晶体电抗为 0；

晶体接在正反馈支路，且反馈最强。



✓ 本节作业

📖 习题 4 (P221)

1 (RC 桥式电路)

📖 题 4.1: 第一小题, 运放的管脚号码 (同相输入端 3, 反相输入端 2)
第二小题, 请说明元件的挑选原则, 电路图不用画了。

所有的题目, 需要有解题过程 (不是给一个答案即可)。

✓ 本节作业

📖 习题 4 (P221)

2 (RC 电路)

5 (LC 电路)

📖 题 4.2/5, 题目修改为:

(1) 从直流通路、交流通路、幅度条件和相位条件出发, 分析并判断各电路是否会产生正弦振荡;

(2) 若不能, 修改电路使能产生正弦振荡。

所有的题目, 需要有解题过程 (不是给一个答案即可)。