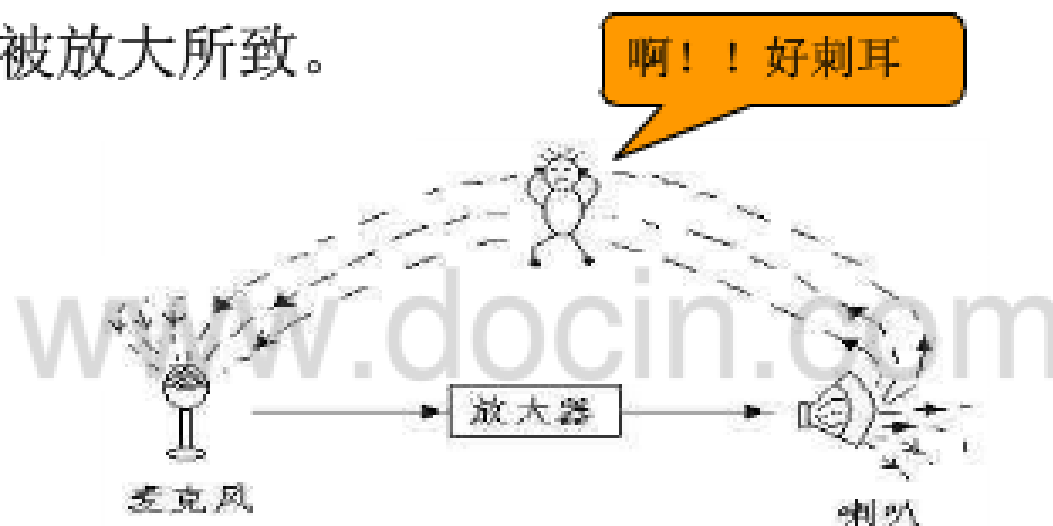


第十章 正弦波振荡电路

- (1) 掌握正弦波振荡电路的组成和振荡原理。
- (2) 掌握**RC**桥式正弦波振荡电路的组成、工作原理。
- (3) 了解**LC**正弦波振荡电路和石英晶体正弦波振荡电路的组成、工作原理和性能特点。

什么是振荡现象呢？

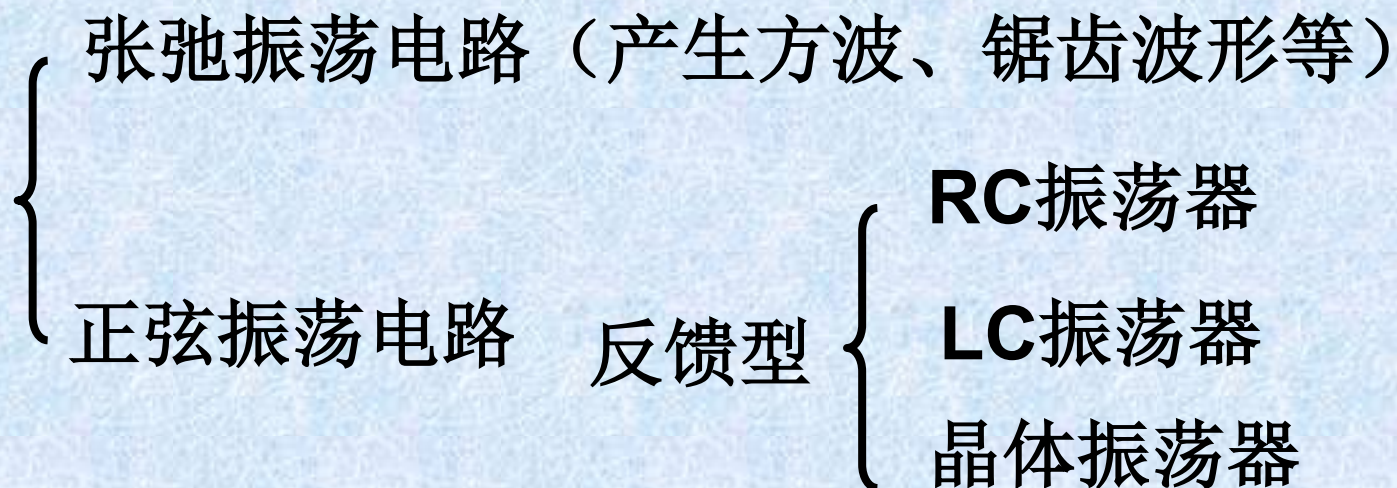
在一些大型集会活动中，经常会因为功放音量开得太大或麦克风离扬声器太近而发出尖锐的啸叫声。这种现象称为振荡现象。它是因为扬声器发出的声音，经过麦克风反复被放大所致。



因此得出：能使电信号长时间以一定的幅值持续波动的现象称为振荡。

振荡器简单地说就是一个频率源，详细说就是一个不需要外信号激励、自身就可以将直流电能转化为交流电能的装置。

振荡电路是指在没有输入信号的情况下，能够自行产生一定幅度、一定频率的输出信号的电路。



10-1 振荡的基本原理

正弦波振荡器的结构

振荡器的功能是在无外输入信号的情况下，电路自动输出一个周期性的交变信号。各种类型的**放大器**，都可通过附加**正反馈**及**选频网络**构成振荡器。

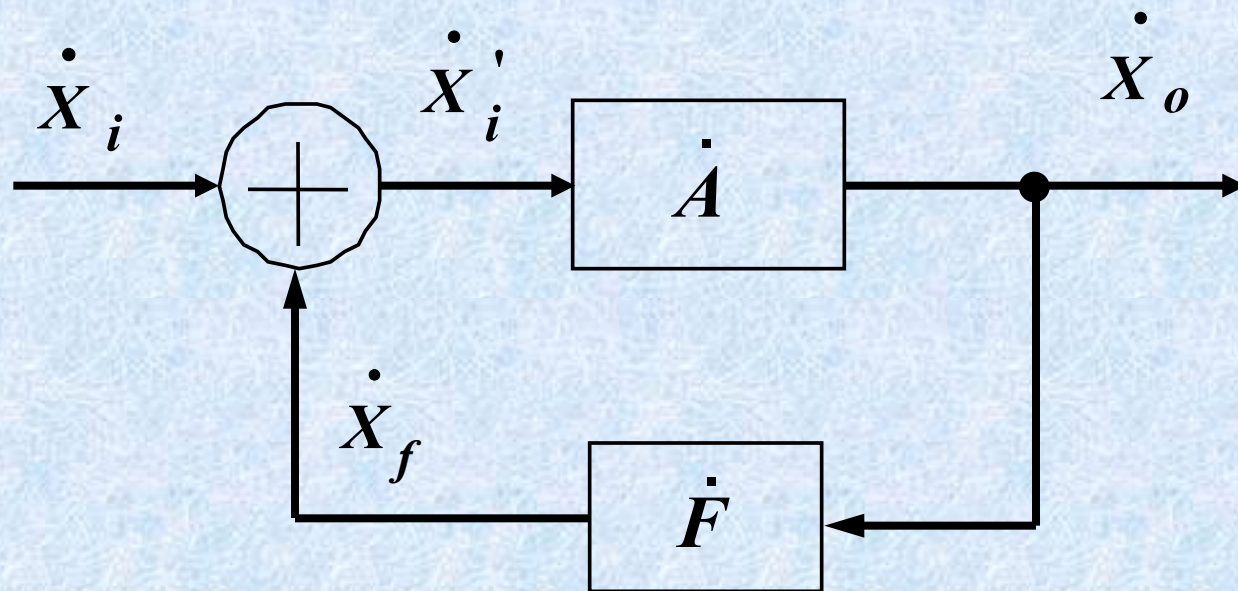
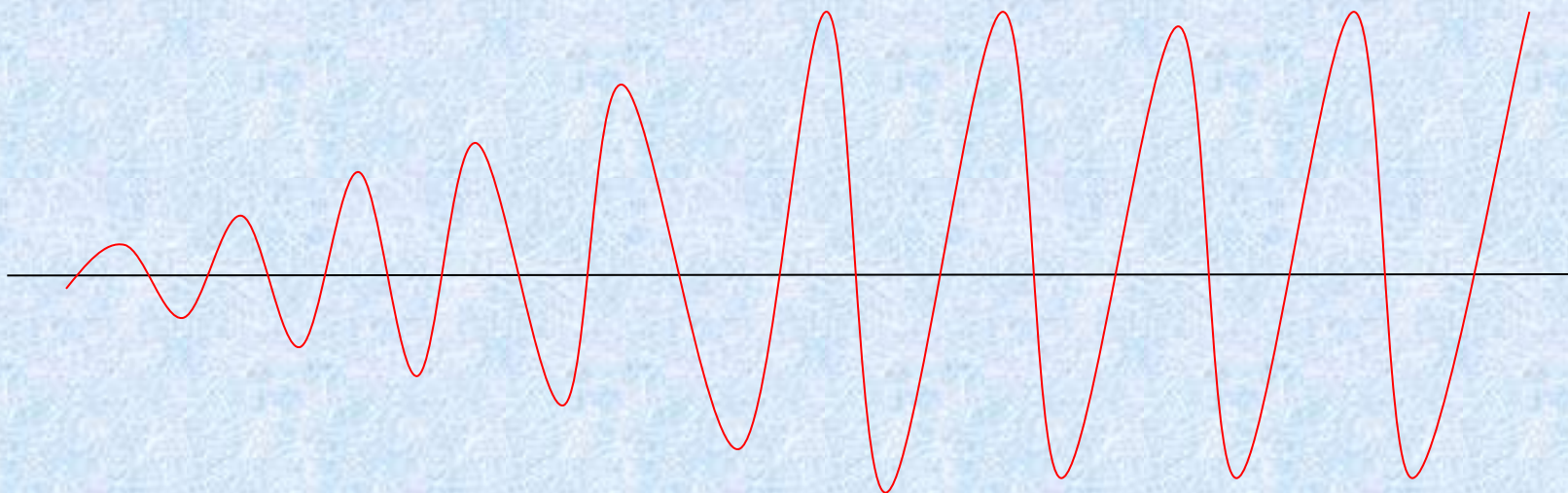


图10.1 反馈放大器

自激振荡的过程

实际应用的振荡器，起始并不需要外加信号激励，而是当接通电源的瞬间，电路收到微弱扰动，就形成了初始信号。这个信号，经过放大器放大、选频后，通过正反馈网络回送到输入端，形成放大——选频——正反馈——再放大的过程，使输出信号的幅度逐渐增大，振荡便由小到大地建立起来了。当信号幅度达到一定数值时，由于晶体管非线性区域的限制作用，使管子的放大作用消弱，即电路的放大倍数下降，振幅也就不再增大，最终使电路维持稳幅振荡。



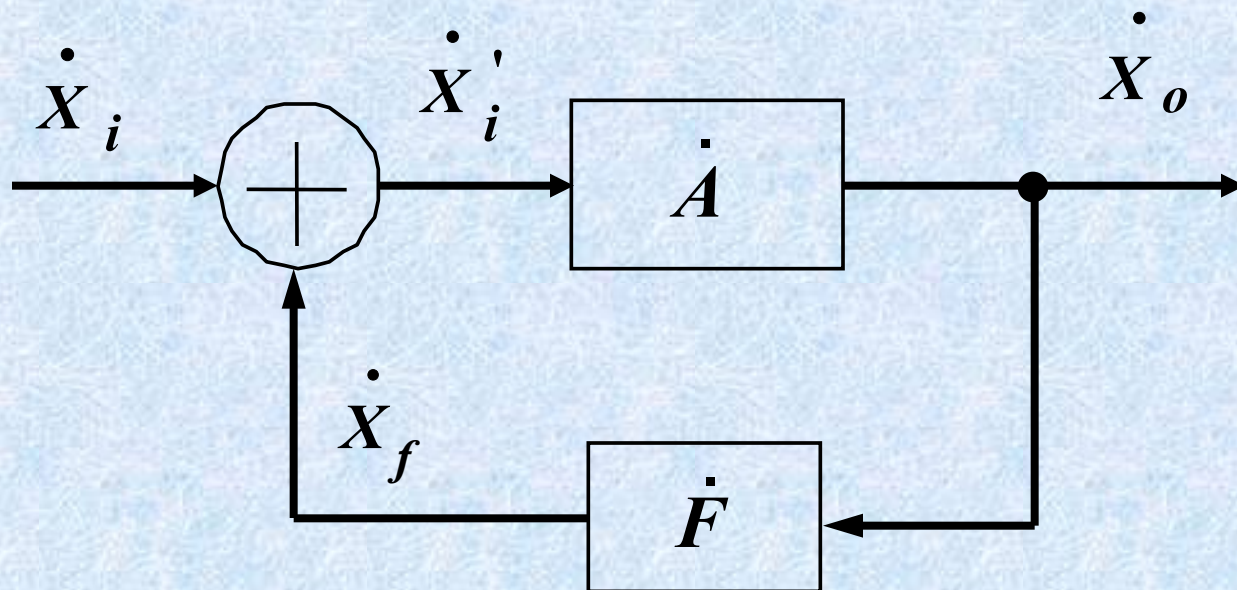
$$\left| \dot{A}_u \dot{F}_u \right| > 1$$

起振

$$\left| \dot{A}_u \dot{F}_u \right| = 1$$

平衡

反馈振荡器的振荡过程



$$\dot{A}_f = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A}}{1 - \dot{A}\dot{F}}$$

当 $\dot{A}\dot{F} = 1$ 时, $\dot{A}_f \rightarrow \infty, \dot{X}_i \rightarrow 0$,

称振荡或自激。

振荡器在实际应用时，不应有上图所示的外加信号。应当是振荡器一加上电后即产生输出，那么初始的激励是从哪里来的呢？

振荡的最初来源是振荡器在接通电源时不可避免地存在的电冲击及各种热噪声等，例如：在加电时晶体管电流由零突然增加，突变的电流包含有很宽的频谱分量，在它们通过负载回路时，由谐振回路的性质即只有频率等于回路谐振频率的分量可以产生较大的输出电压，而其它频率成分不会产生压降，因此负载回路上只有频率为回路谐振频率的成分产生压降，该压降通过反馈网络产生出较大的正反馈电压，反馈电压又加到放大器的输入端，进行放大、反馈，不断地循环下去，谐振负载上将得到频率等于回路谐振频率的输出信号。

二、起振过程和平衡条件

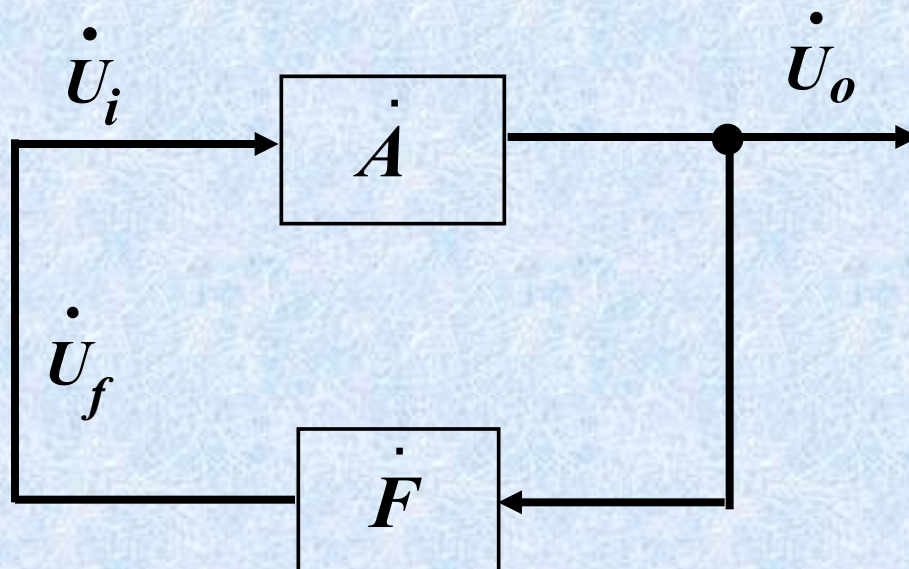
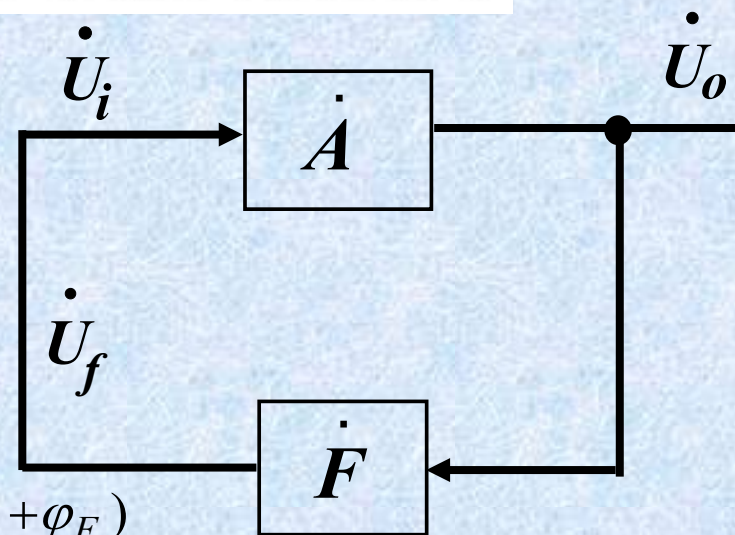


图10.1' 反馈型振荡器组成方框图

1. 起振过程及起振条件

在振荡开始时由于激励信号较弱，输出电压的振幅 \dot{U}_o 较小，经过不断放大、反馈循环，输出幅度 \dot{U}_o 逐渐增大，否则输出信号幅度过小，没有任何价值。为了使振荡过程中输出幅度不断增加，应使反馈回来的信号比输入到放大器的信号大，即振荡开始时应为增幅振荡，因而



$$\dot{A}_u \dot{F}_u > 1 \quad \text{即} \quad \dot{U}_f > \dot{U}_i$$

$$\dot{A}_u \dot{F}_u = A_u e^{j\varphi_A} F_u e^{j\varphi_F} = A_u F_u e^{j(\varphi_A + \varphi_F)}$$

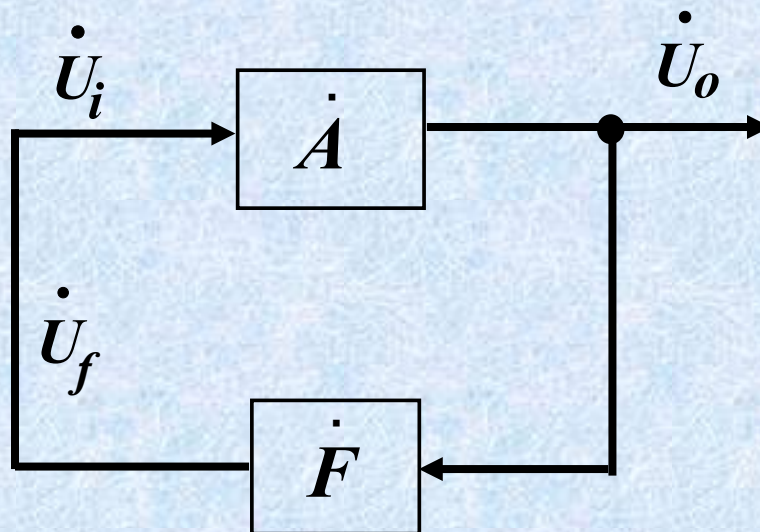
$$\left\{ \begin{array}{l} A_u F_u > 1 \end{array} \right. \quad \text{幅度起振条件}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{array} \right. \quad \text{相位起振条件}$$

2. 平衡条件

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

$$\dot{U}_f = \dot{U}_i$$



$$\dot{A}_u \dot{F}_u = A_u e^{j\varphi_A} F_u e^{j\varphi_F} = A_u F_u e^{j(\varphi_A + \varphi_F)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_u F_u = 1 \text{ 振幅平衡条件} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_A + \varphi_F = \pm 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{ 相位平衡条件} \end{array} \right.$$

振荡器工作时怎样由 $\dot{A}_u \dot{F}_u > 1$ 过渡到 $\dot{A}_u \dot{F}_u = 1$ 的呢？我们知道放大器进行小信号放大时必须工作在晶体管的线性放大区，即起振时放大器工作在线性区，此时放大器的输出随输入信号的增加而线性增加；随着输入信号振幅的增加，放大器逐渐由放大区进入截止区或饱和区，进入非线性状态，此时的输出信号幅度增加有限，即增益将随输入信号的增加而下降，如图4-2所示。所以，振荡器工作到一定阶段，环路增益将下降。

振幅的增长过程将停止，振荡器到达平衡状态，进行等幅振荡。因此，振荡器由增幅振荡过渡到稳幅振荡，是由放大器的非线性完成的。需要说明的是，电路的起振过程是非常短暂的，可以认为只要电路设计合理，满足起振条件，振荡器一通上电，输出端就有稳定幅度的输出信号。

在平衡状态中，电源供给的能量正好抵消整个环路损耗的能量，平衡时输出幅度将不再变化，因此振幅平衡条件决定了振荡器输出振幅的大小。必须指出，环路只有在某一特定的频率上才能满足相位平衡条件，也就是说相位平衡条件决定了振荡器输出信号的频率大小，**取 $n=0$** 得到的根即为振荡器的振荡频率，一般在回路的谐振频率附近。

利用相位平衡条件确定振荡器工作频率的方法：

$$\dot{A}_u \dot{F}_u = A_u e^{j\varphi_A} F_u e^{j\varphi_F} = A_u F_u e^{j(\varphi_A + \varphi_F)} = 1$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{I}_c \dot{Z}_L}{\dot{U}_i} = g_m e^{j\varphi_Y} Z_L e^{j\varphi_Z} = A_u e^{j\varphi_A}$$

$$\dot{F}_u = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = F_u e^{j\varphi_F}$$

$$\varphi_A + \varphi_F = \varphi_Y + \varphi_Z + \varphi_F = 0 \quad (\text{取 } n=0)$$

$$\text{令 } \varphi_Y + \varphi_F = \varphi_E \quad \text{则 } \varphi_Z = -\varphi_E$$

-----确定工作频率的方法

构成正弦波振荡器还必须附加选频电路，选出一个特定的频率，保证电路中只有这个频率的信号满足自激振荡条件，使振荡器输出的波形为单一频率正弦波。

LC串、并联电路是常用的选频电路。

正弦波振荡器的结构：

- 放大电路（包括负反馈放大电路）
- 反馈网络（构成正反馈的）
- 选频网络（选择满足相位平衡条件的一个频率。经常与反馈网络合二为一。）
- 稳幅环节

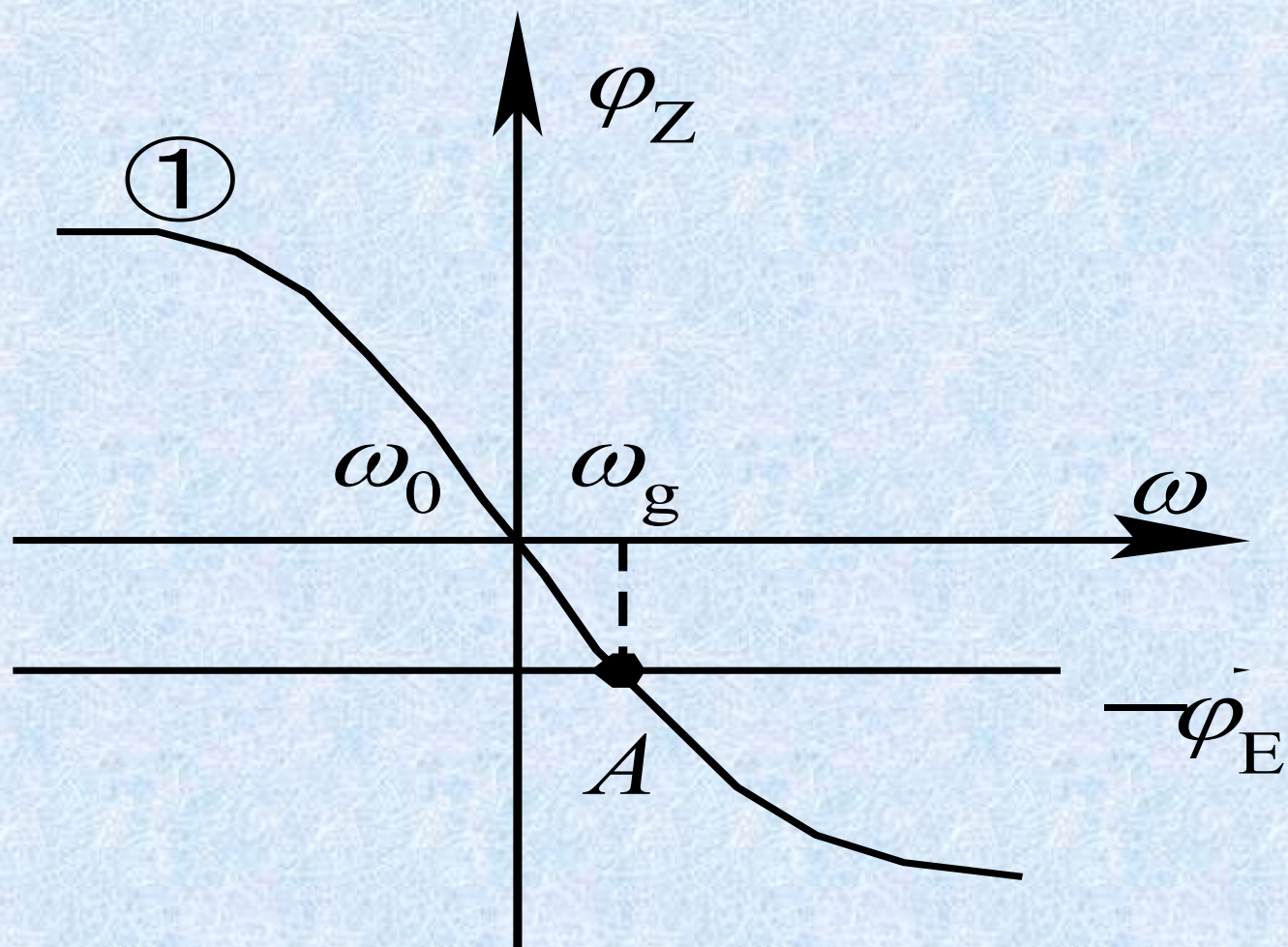
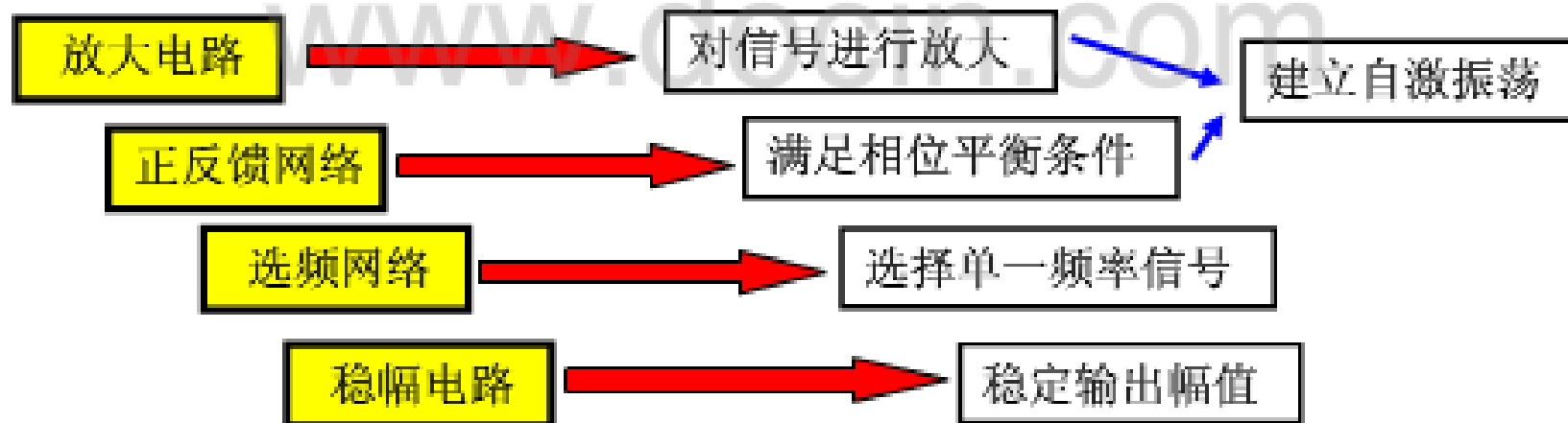
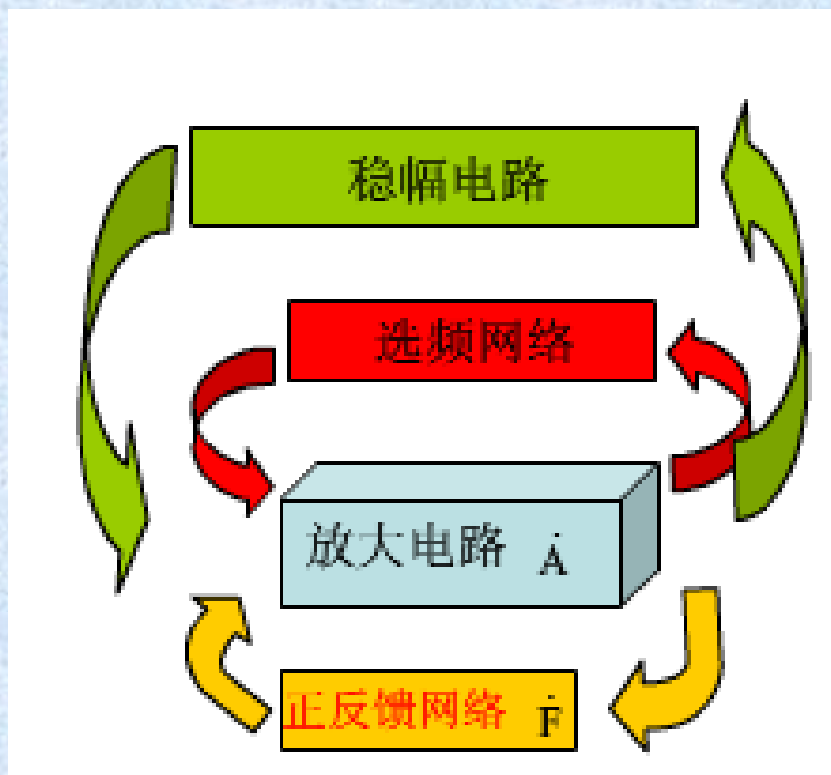
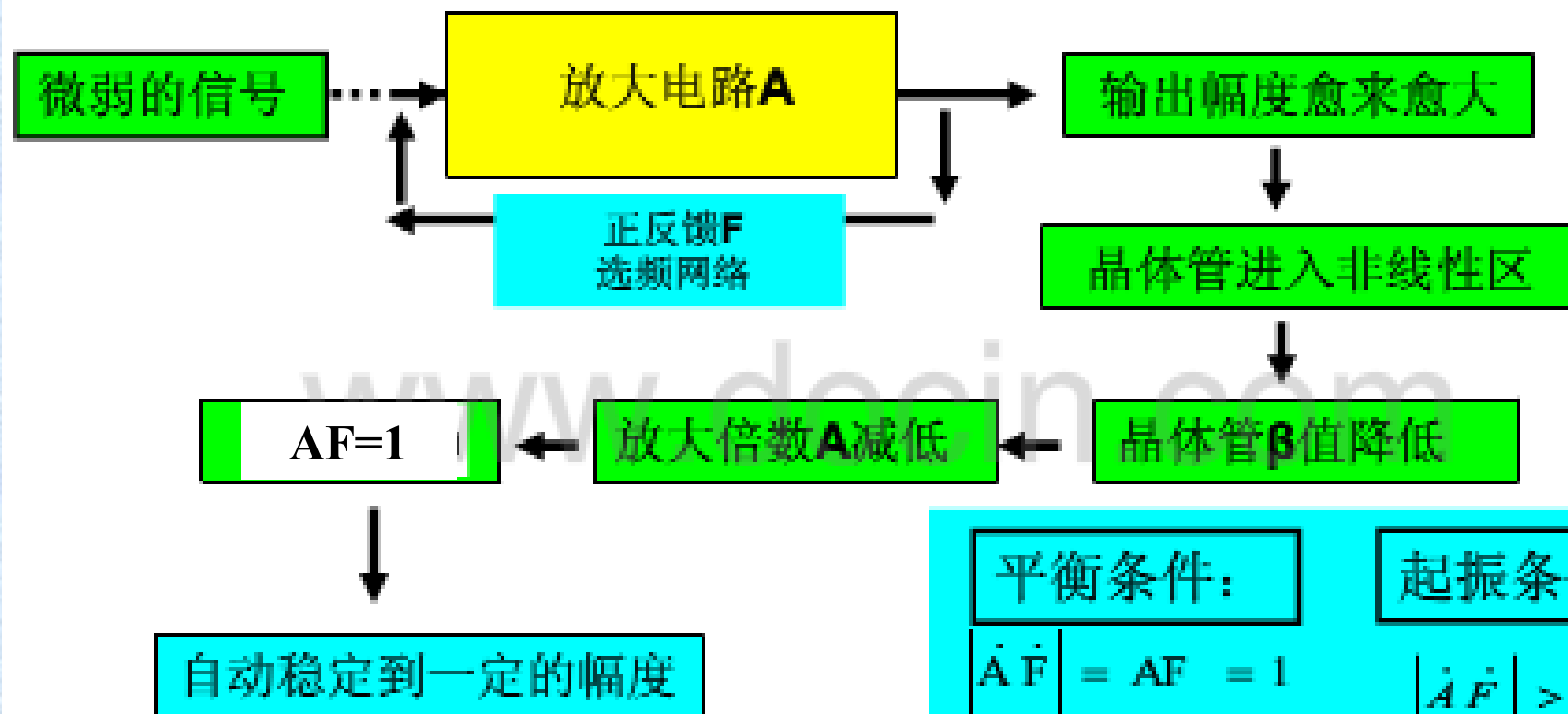


图10.5 LC并联回路负载相角与频率的关系

正弦波振荡电路的结构:



正弦波振荡电路是如何工作的？



平衡条件:

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

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi$$

起振条件:

$$|\dot{A}\dot{F}| > 1$$

10.2 RC正弦波振荡器

RC 电路作为选频网络的振荡器称为**RC**振荡器。

RC振荡器的振荡频率较低，一般是几十kHz以下的中低频信号。

RC移相振荡器

选频网络采用**RC超前或滞后移相网络**。

RC选频振荡器

选频网络采用**RC串并联谐振网络**。

10.2.1 RC移相振荡器

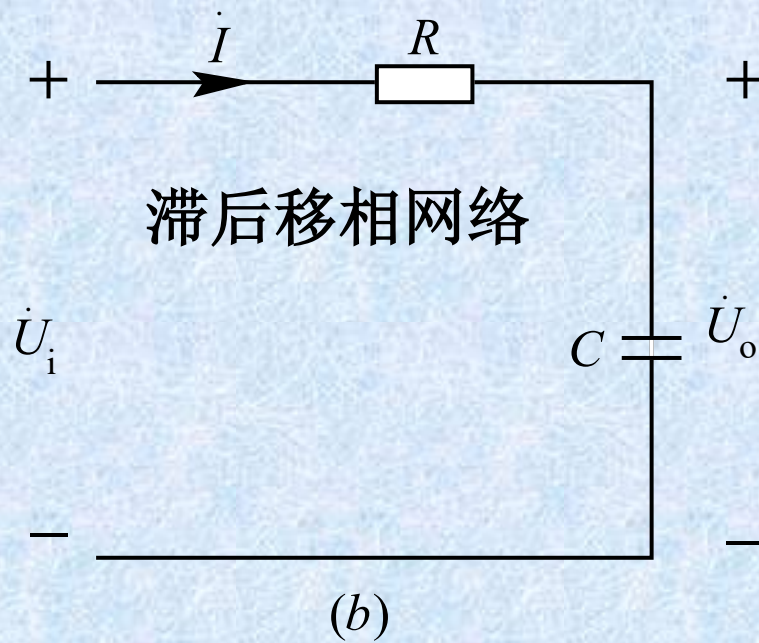
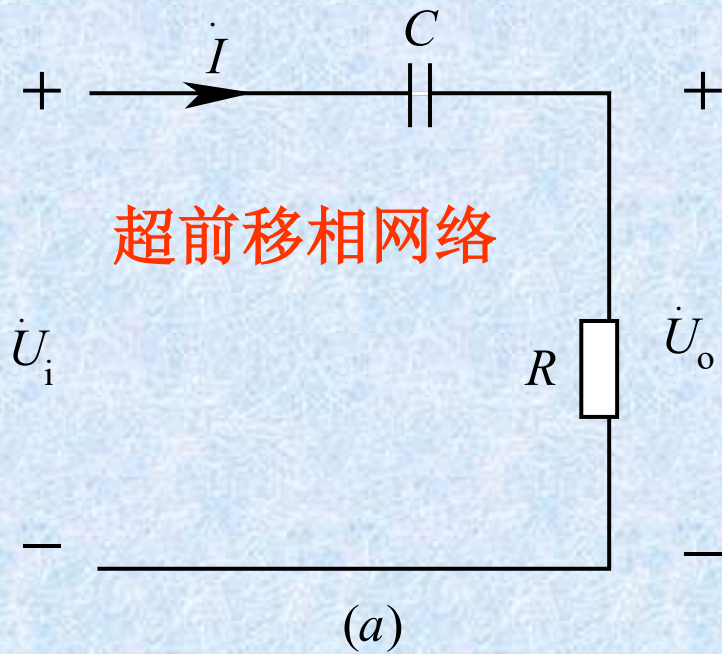
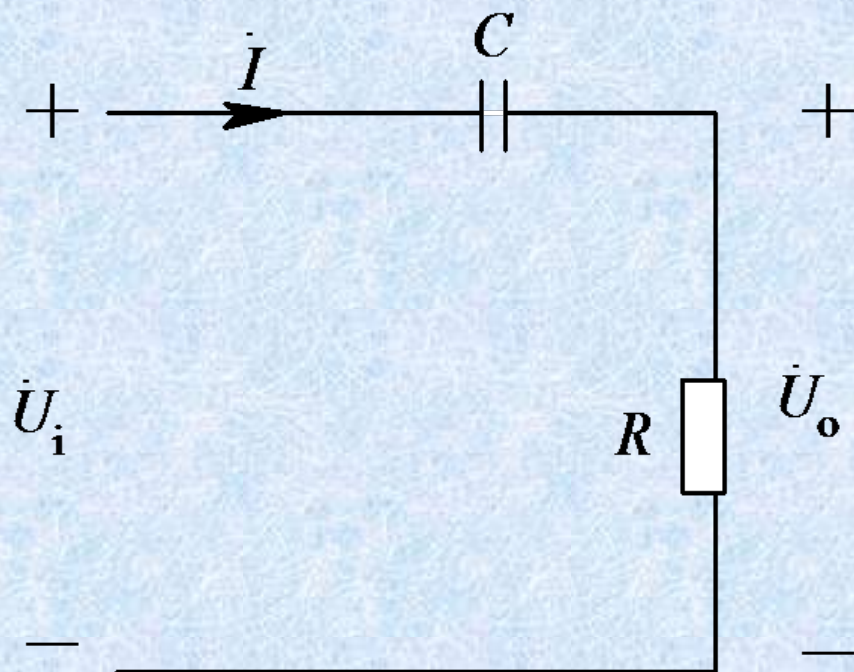


图10.17 RC串联移相网络



传输系数 $\dot{H} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

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

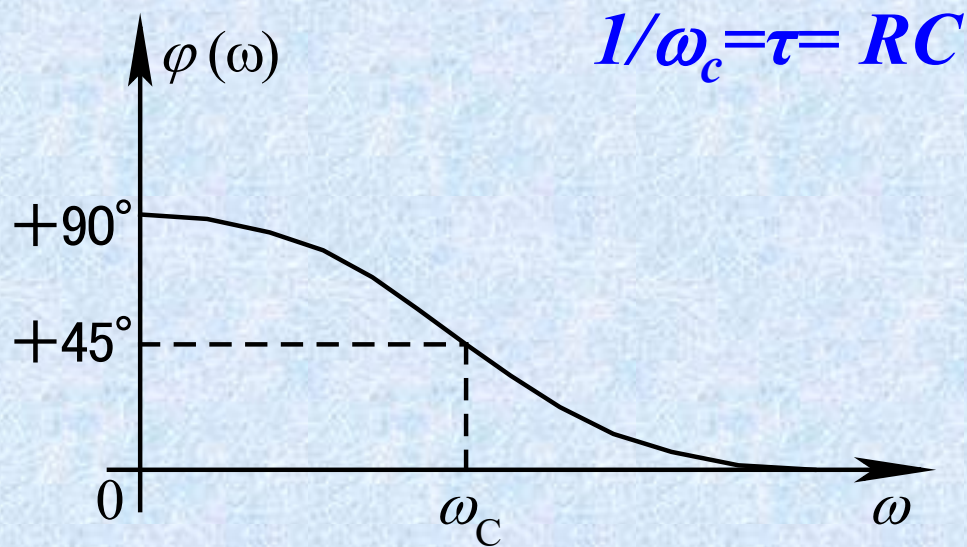
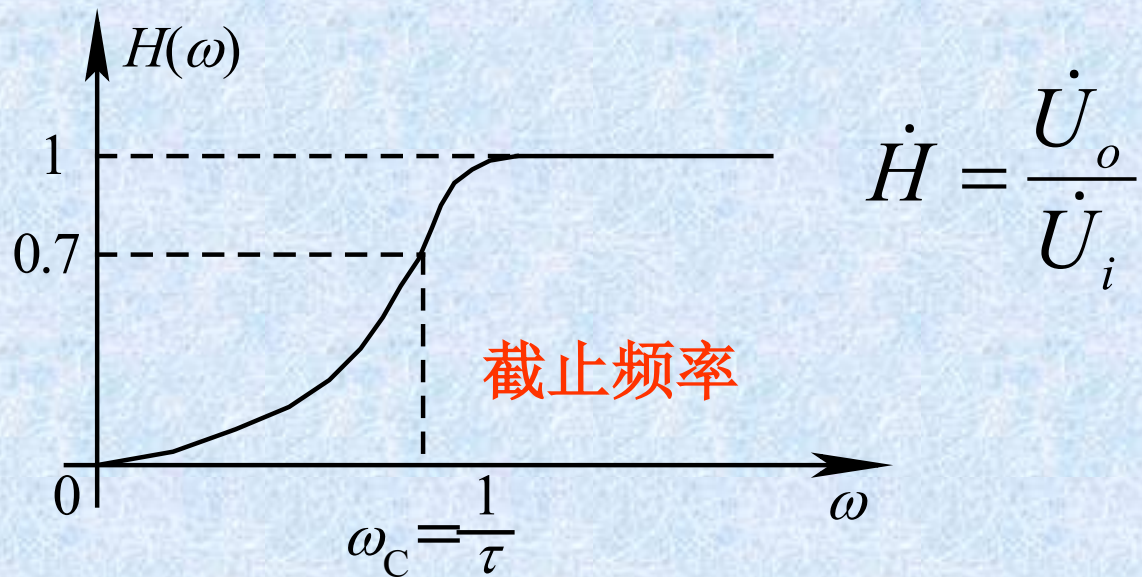
(a) 其模值和相角分别为

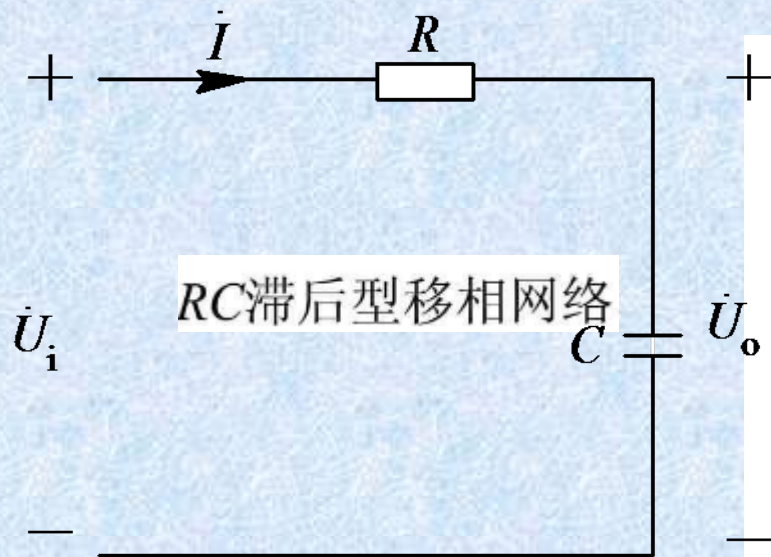
$$\mathbf{H} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} = \frac{\omega / \omega_0}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_0)^2}}$$

$$1/\omega_c = \tau = RC$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{1}{\omega RC} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega}{\omega_0}$$

RC串联超前网络的幅频特性和相频特性分别如图





(b)

传输系数 $\dot{H} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$

$$= \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega CR} = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0}}$$

其模值和相角分别为

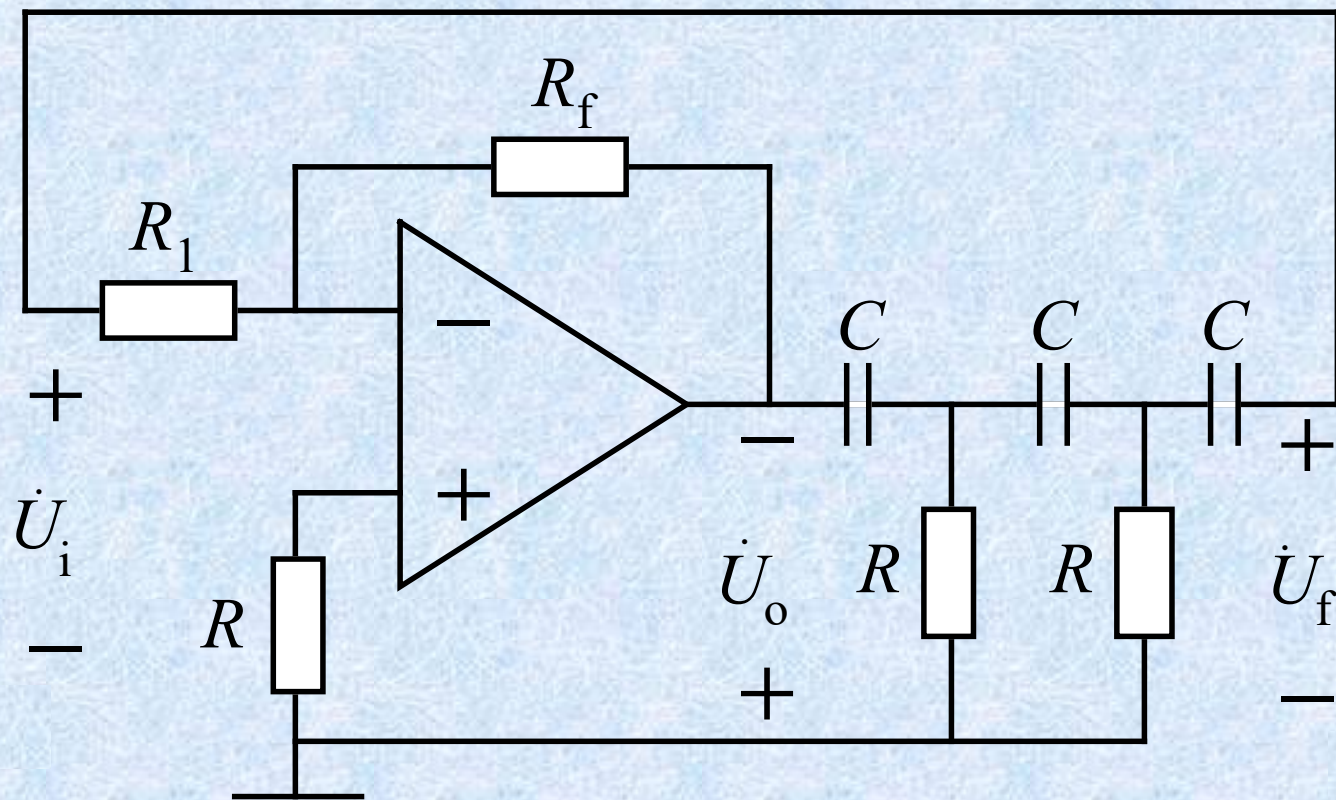
$$\mathbf{H} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_0)^2}}$$

$$\varphi = -\arctan \omega CR = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0}$$

式中 $\omega_0 = 1/(RC)$

结论:

1. 随着频率的改变, 单支节RC电路中所产生的相移在 $0\sim 90^\circ$ 之间变化, 但最大不超过 90° 。
2. 输出电压幅度也随频率变化而变化, 但输出电压总是小于输入电压, 且相移越大, 输出电压越小。



集成运放：反相放大，相移 -180° ，当 RC 导前相移电路提供 180° 相移时，环路满足相位平衡条件。

一节 RC 电路提供最大相移小于 90° (相位趋近 90° 时，增益已趋于 0)，故需三节 RC 电路才能提供 180° 相移。

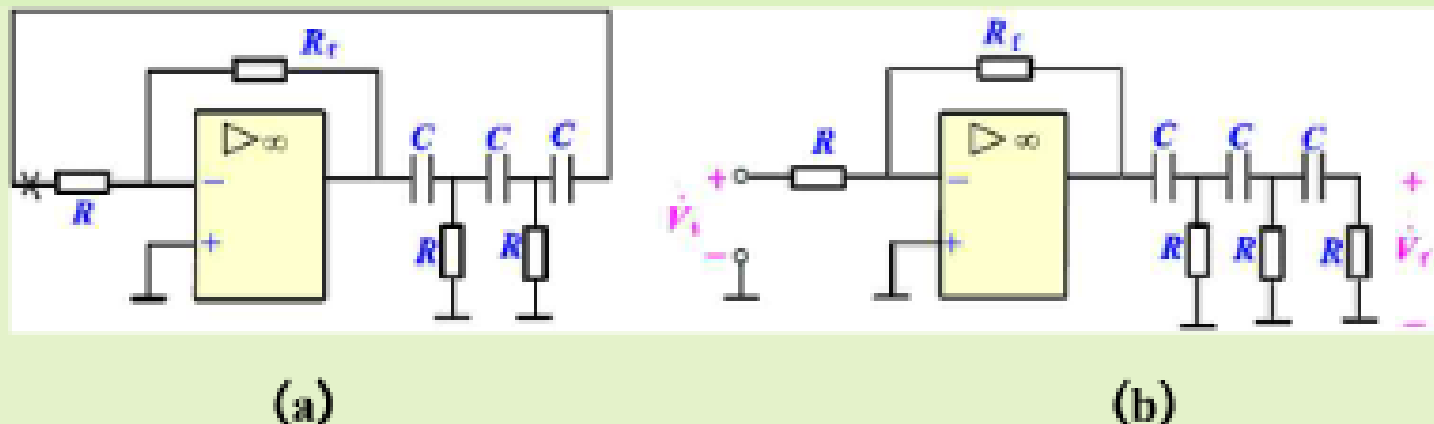


图 3-5-2 RC 相移振荡电路

将其在 \times 处断开，断开点的右端加 \dot{V}_i ，左端接运放的输入电阻（其值等于 R ），得图 3-5-2 (b)。可得出环路增益

$$T(j\omega) = -\frac{R_f}{R} \cdot \frac{\omega^3 R^3 C^3}{\omega^3 R^3 C^3 - 5\omega RC - j(6\omega^2 C^2 R^2 - 1)}$$

由此可以得到振荡频率和振幅起振条件分别为

令 $T(j\omega)$ 虚部等于零 $\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{6}RC} \quad \frac{R_f}{R} > 29$

由于 RC 相移电路的选频特性不理想，因而它的输出波形失真大，频稳度低，只能用在要求不高的设备中。

10.2.2 RC选频振荡器

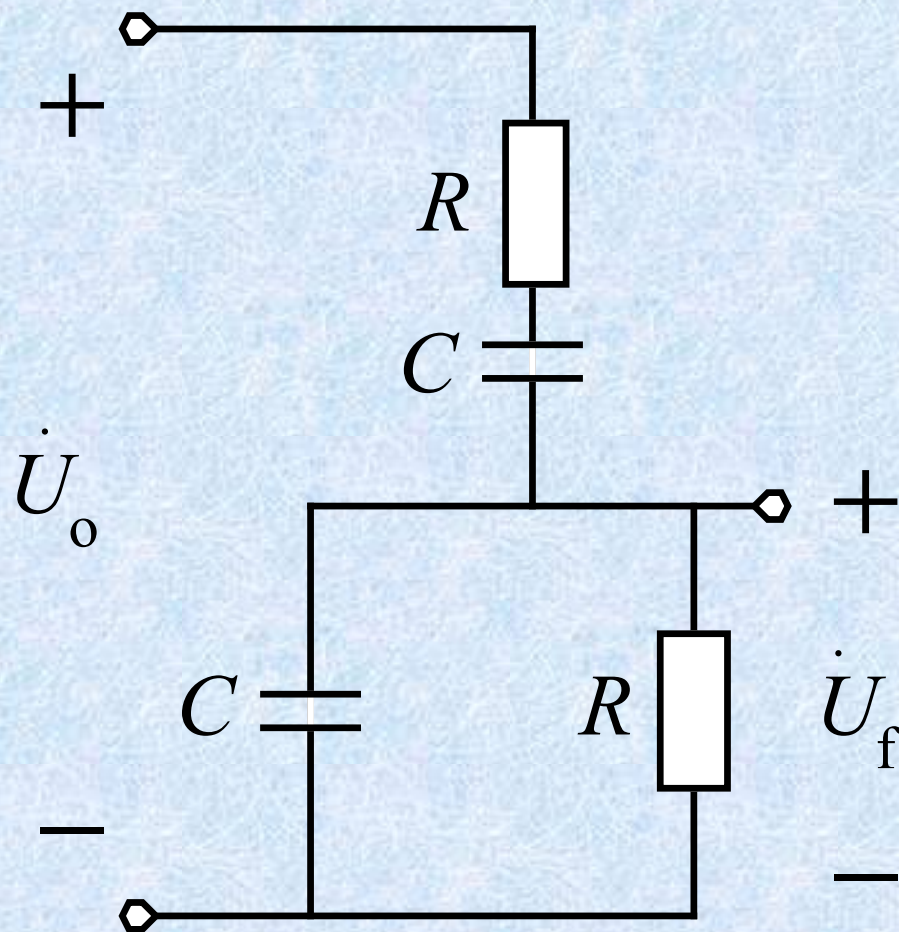
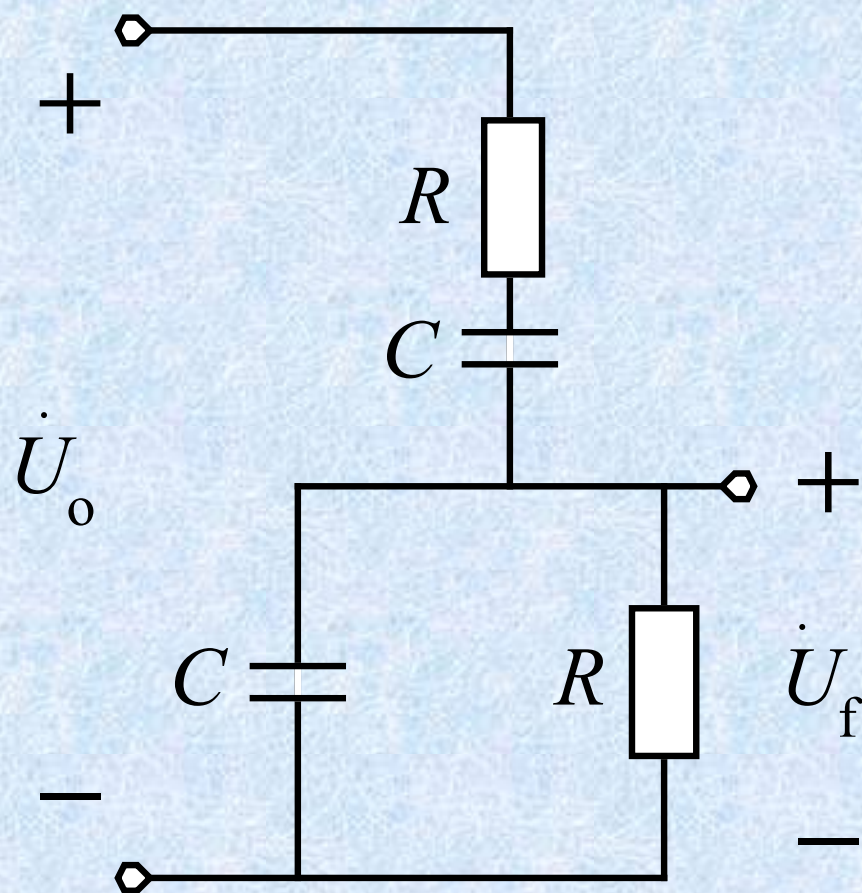


图10.20 RC串并联网络

传输系数

$$\dot{H} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}$$



$$\begin{aligned} &= \frac{\frac{R}{1 + j\omega RC}}{R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{R}{1 + j\omega CR}} \\ &= \frac{1}{3 + j\left(\omega CR - \frac{1}{\omega CR}\right)} \\ &= \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \end{aligned}$$

式中 $\omega_0=1/RC$ ，其模和相角分别为

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

$$\varphi = -\arctan \frac{1}{3} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

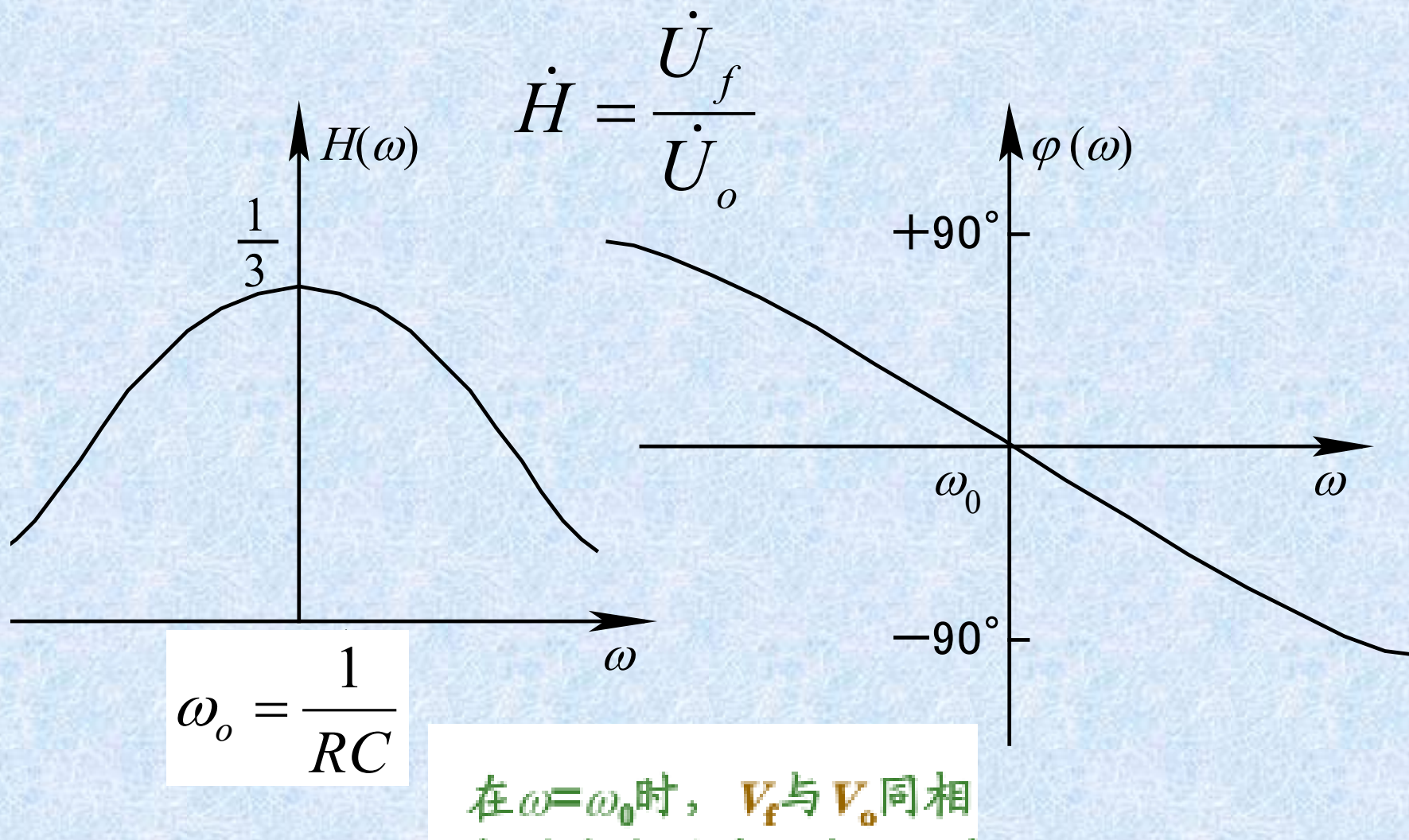
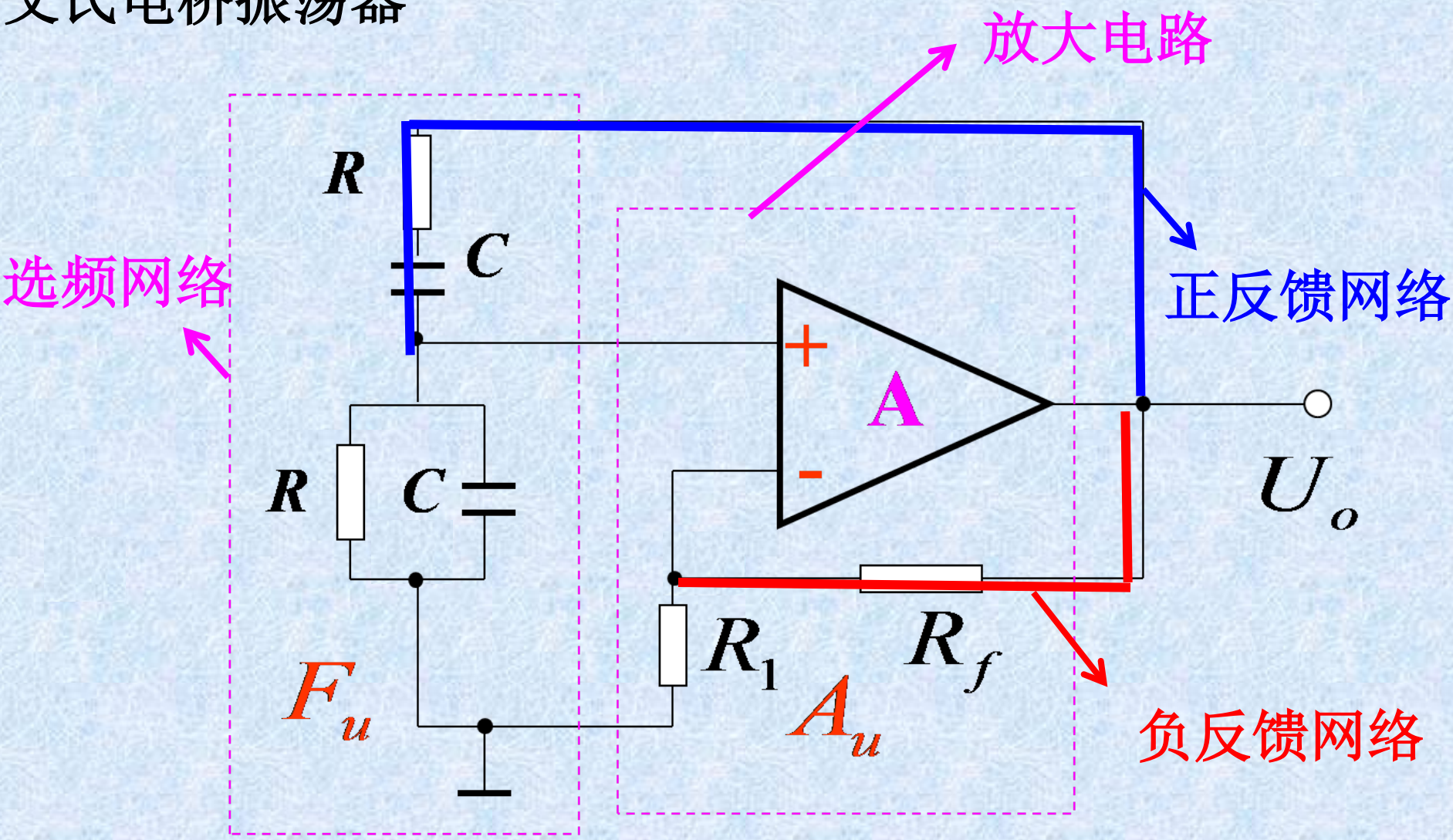
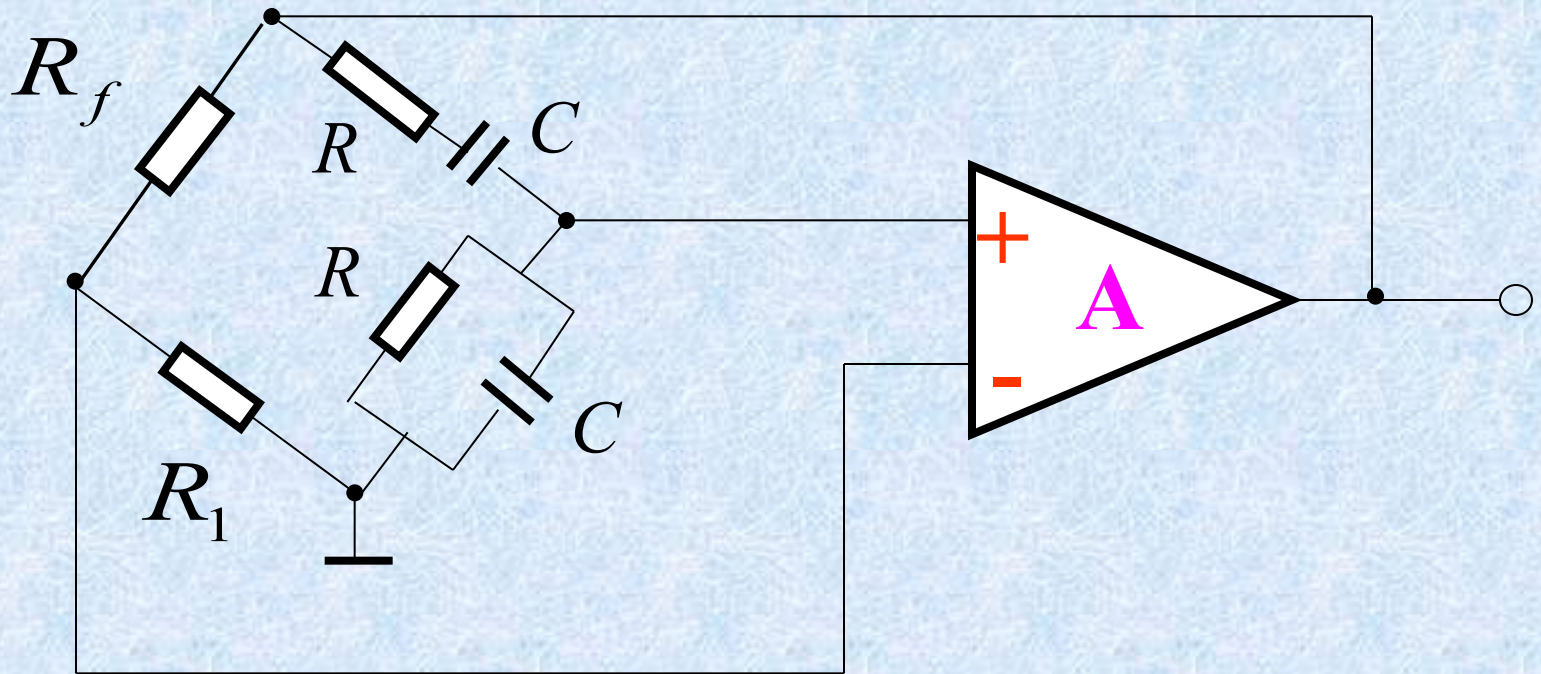


图10.21 RC串并联网络的频率特性曲线

文氏电桥振荡器

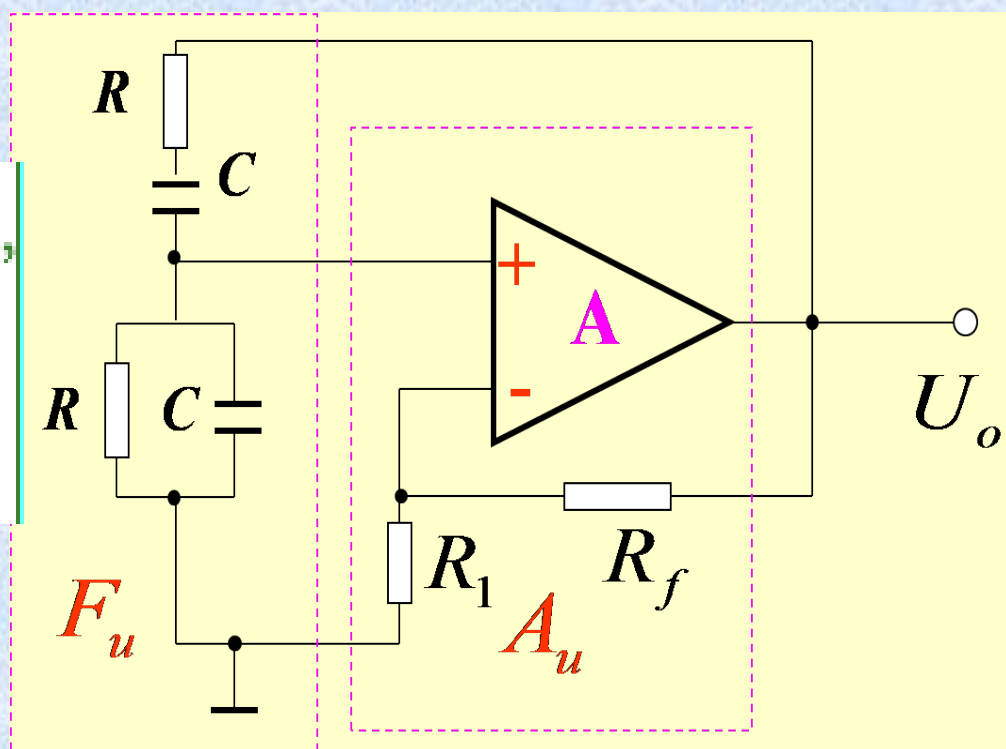




文氏电桥多用于产生**20HZ~200kHz**的低频信号发生器中。

文氏电桥振荡器

当外来频率 $\omega=\omega_0$ 时， $\varphi_f=0$ ，其意义为：在输入的各种频率中只有 ω_0 这个频率的 V_f 与 V_o 是同相的。



1. 振荡频率:

因为振荡电路的相位条件为 $\varphi_A + \varphi_F = 0$,

$\omega_0=1/(RC)$ 是一个由选频网络本身特性决定的频率，与外来频率无关。它对外来频率相当于起到一个门的作用，外来频率与这个频率相同，选频网络的门就打开让其通过，其它频率则受到衰减。

$$\text{所以 } \omega_g = \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

运放为同相输入，相移 $\varphi_A = 0$

起振条件应当是相移等于零，故此电路

又称零相移桥式振荡器。

2. 起振条件 $A_u F_u > 1$

$$A_u = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1} > 3$$

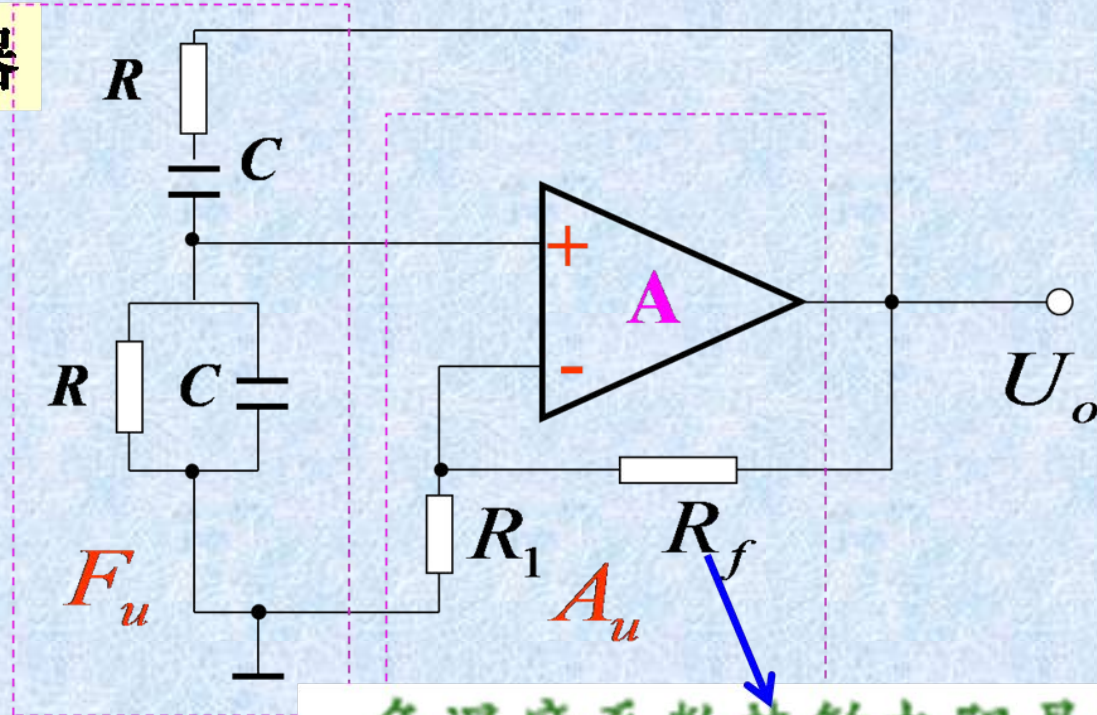
由前面结果可知,

处于工作频率 $\omega_g = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时, $F_u = \frac{1}{3}$

所以 $A_u > \frac{1}{F_u} = 3$ ($F_u = \frac{1}{3}$) 即 $R_f > 2R_1$

3. 引入 R_f 、 R_1 构成的串联电压负反馈电路, 能起到稳定输出幅度的作用。提高了输入电阻, 减小了输出电阻。

文氏电桥振荡器



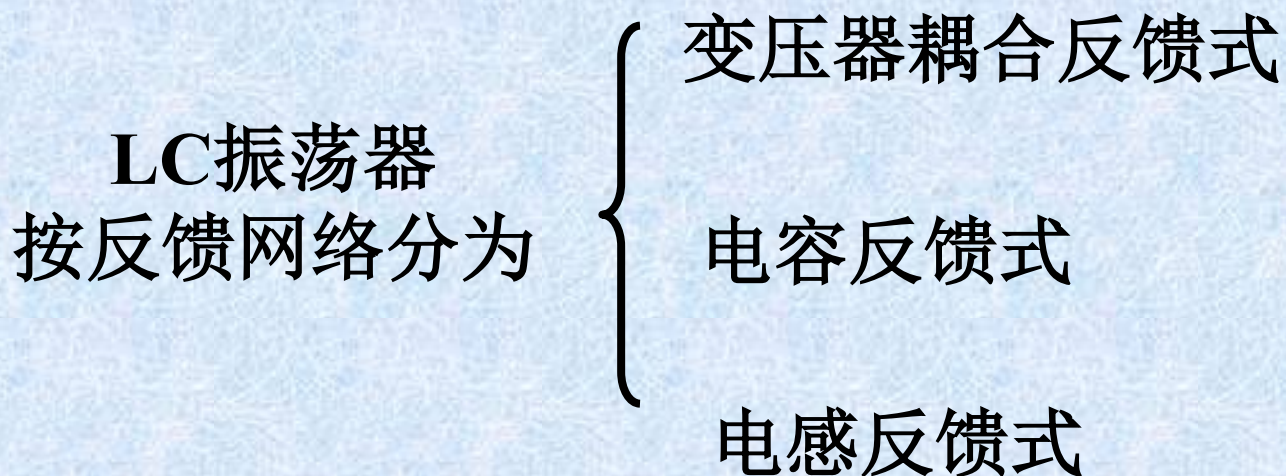
负温度系数热敏电阻是随温度升高电阻值减少的元件。

刚起振时， R_f 的温度最低，相应的电阻最大，因而运放增益最大，使 $AF(\omega_0) > 1$ 。

振幅过大， R_f 上消耗的功率增加，致使温度上升，阻值减小，直到 $AF(\omega_0) = 1$ ，进入平衡状态。

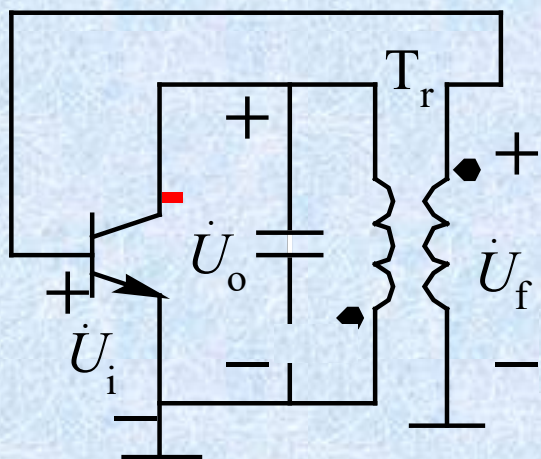
10.3 LC正弦波振荡器

采用**LC**谐振回路作为选频网络的反馈式振荡器称为**LC正弦波振荡器**。可以产生**几十兆赫**以上的正弦波信号。



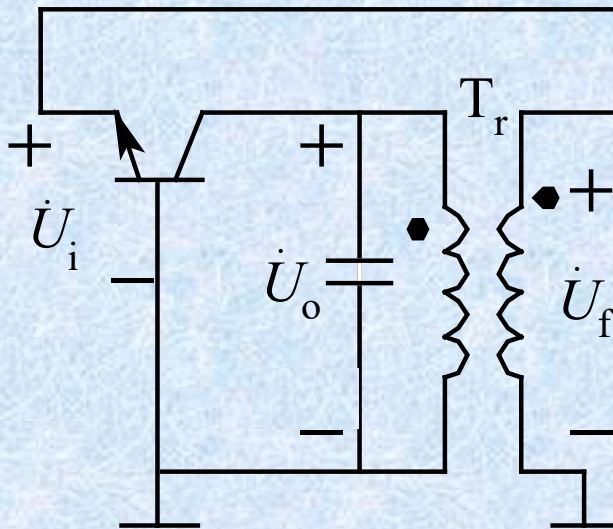
10.3.1 变压器耦合反馈式振荡器

(共射)



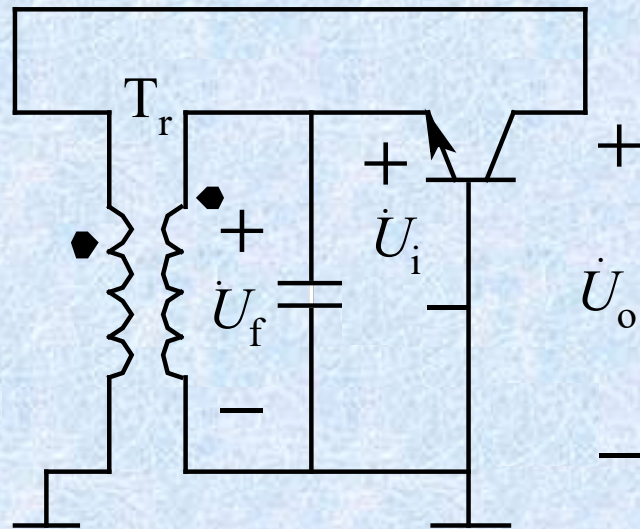
(a)

(共基)



(b)

(共基)



(c)

依靠线圈之间的互感耦合实现正反馈

判断相位平衡条件是否满足的方法：通常采用瞬时极性法。

判断 U_i 与 U_f 是否同相位

图10.23 三种不同接法的变压器耦合反馈式振荡器

10.3.2. 电容反馈式振荡电路

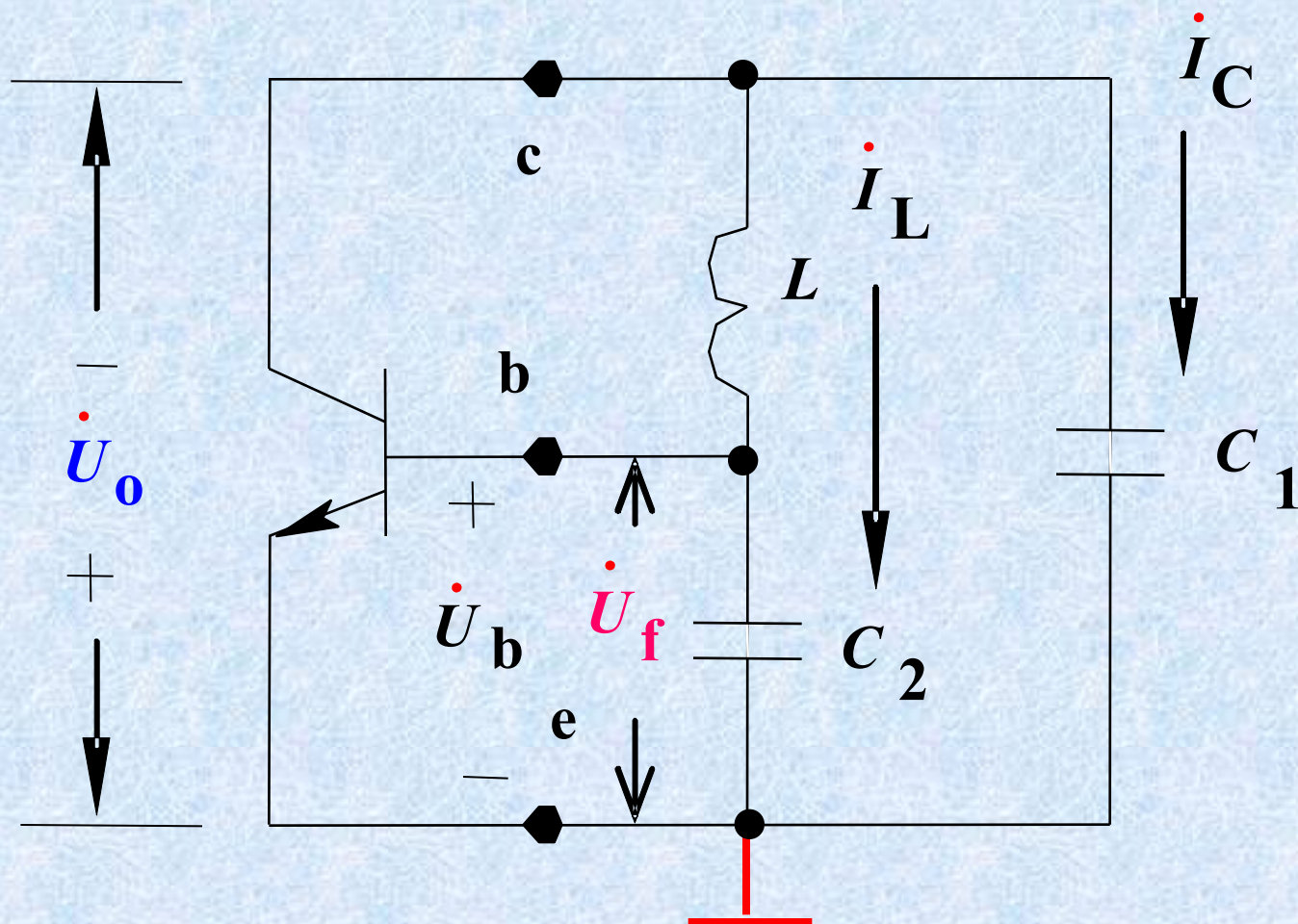
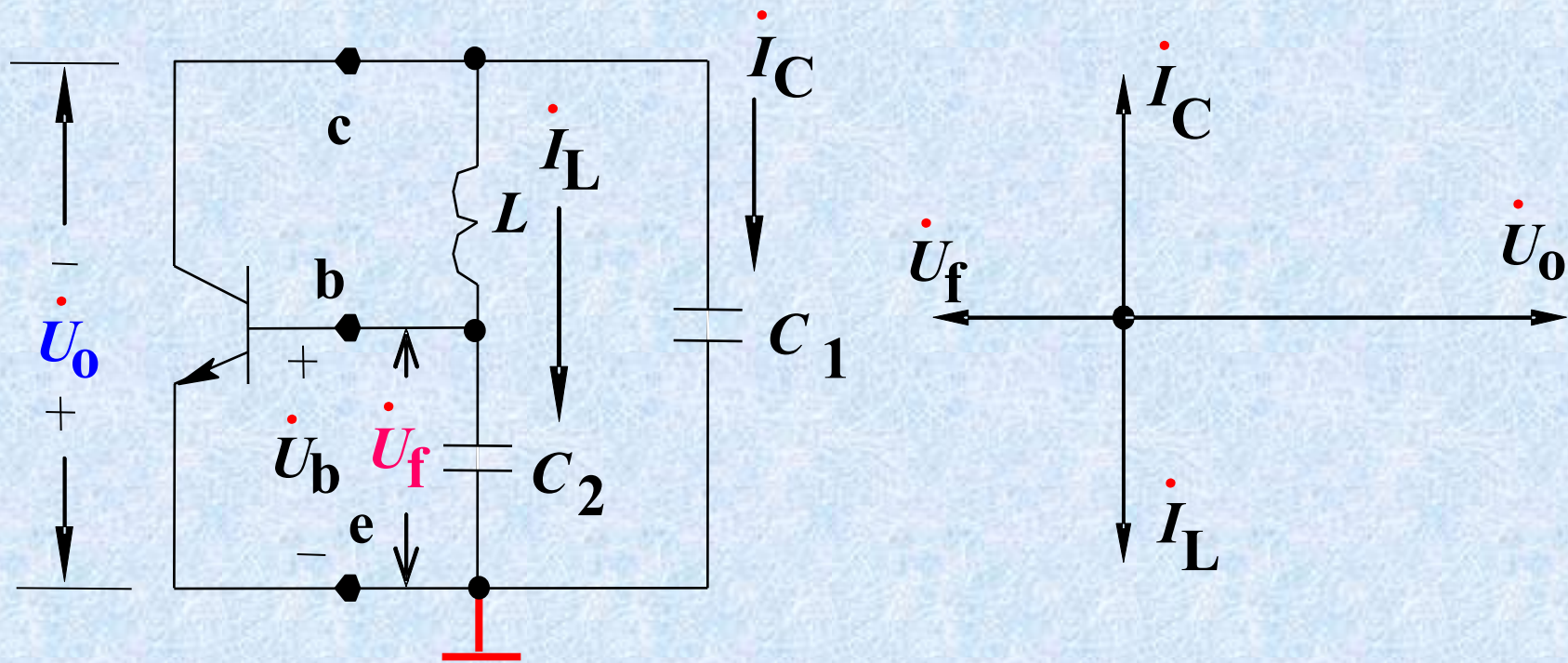
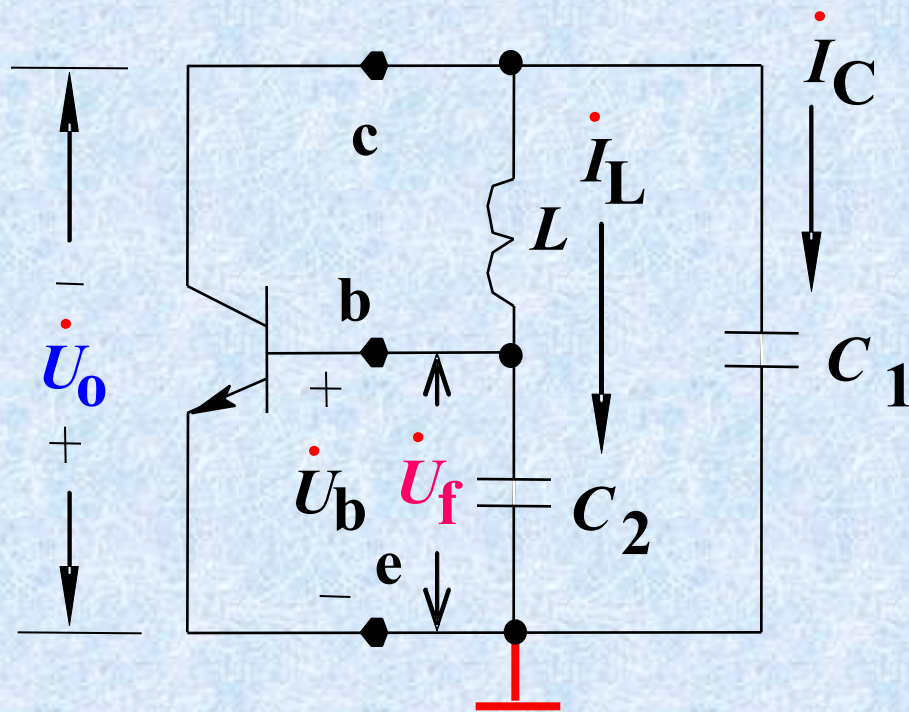


图10.24电容反馈式振荡器的交流通路（共射）

是否满足振荡的相位条件： U_i 与 U_f 同相位



10.25 电容反馈式振荡器电矢量关系



$$\omega_g = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

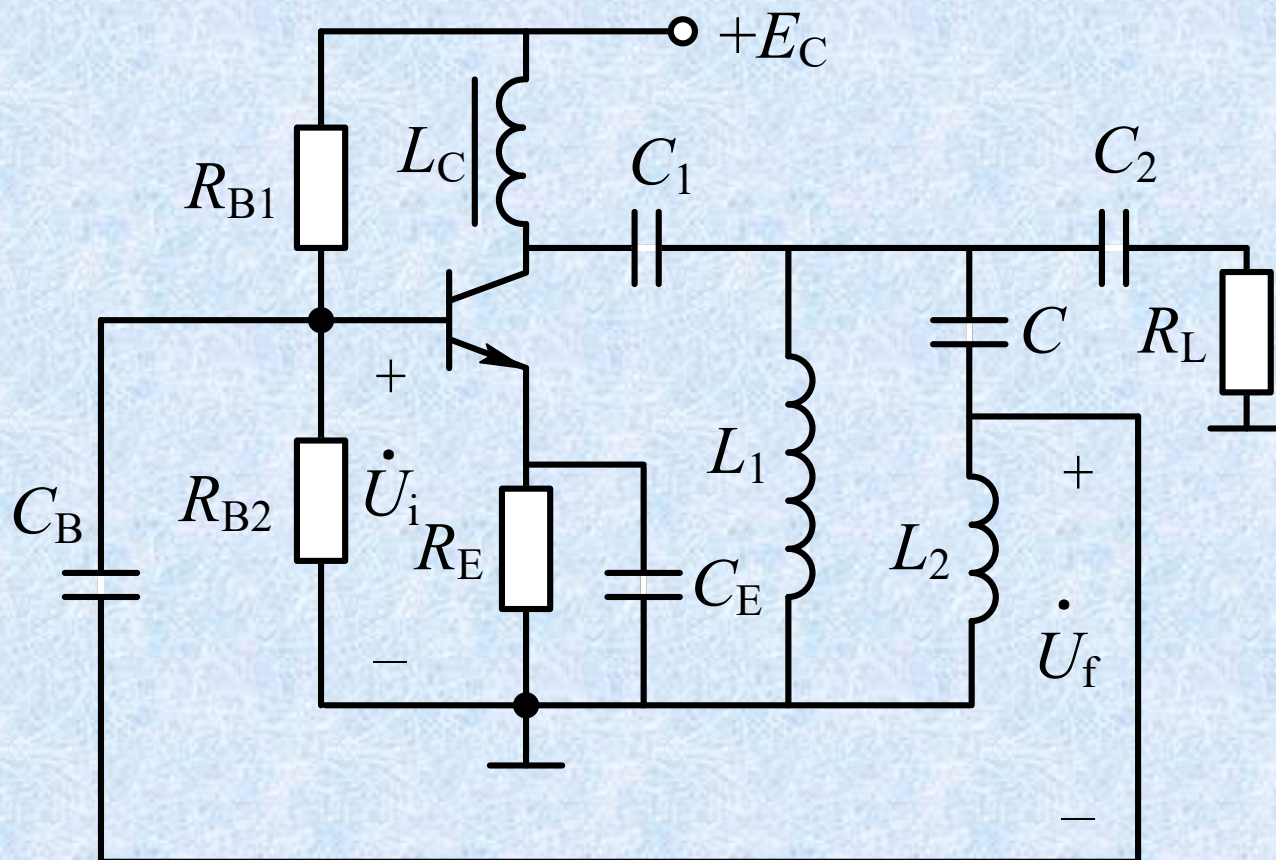
$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{\dot{I}_L \frac{1}{j\omega C_2}}{\dot{I}_C \frac{1}{j\omega C_1}} = -\frac{C_1}{C_2}$$

我们在分析计算振荡器的振荡频率时可以近似用回路的

谐振频率来表示，即

$$\omega_1 \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

10.3.3 电感反馈式振荡电路



(a)

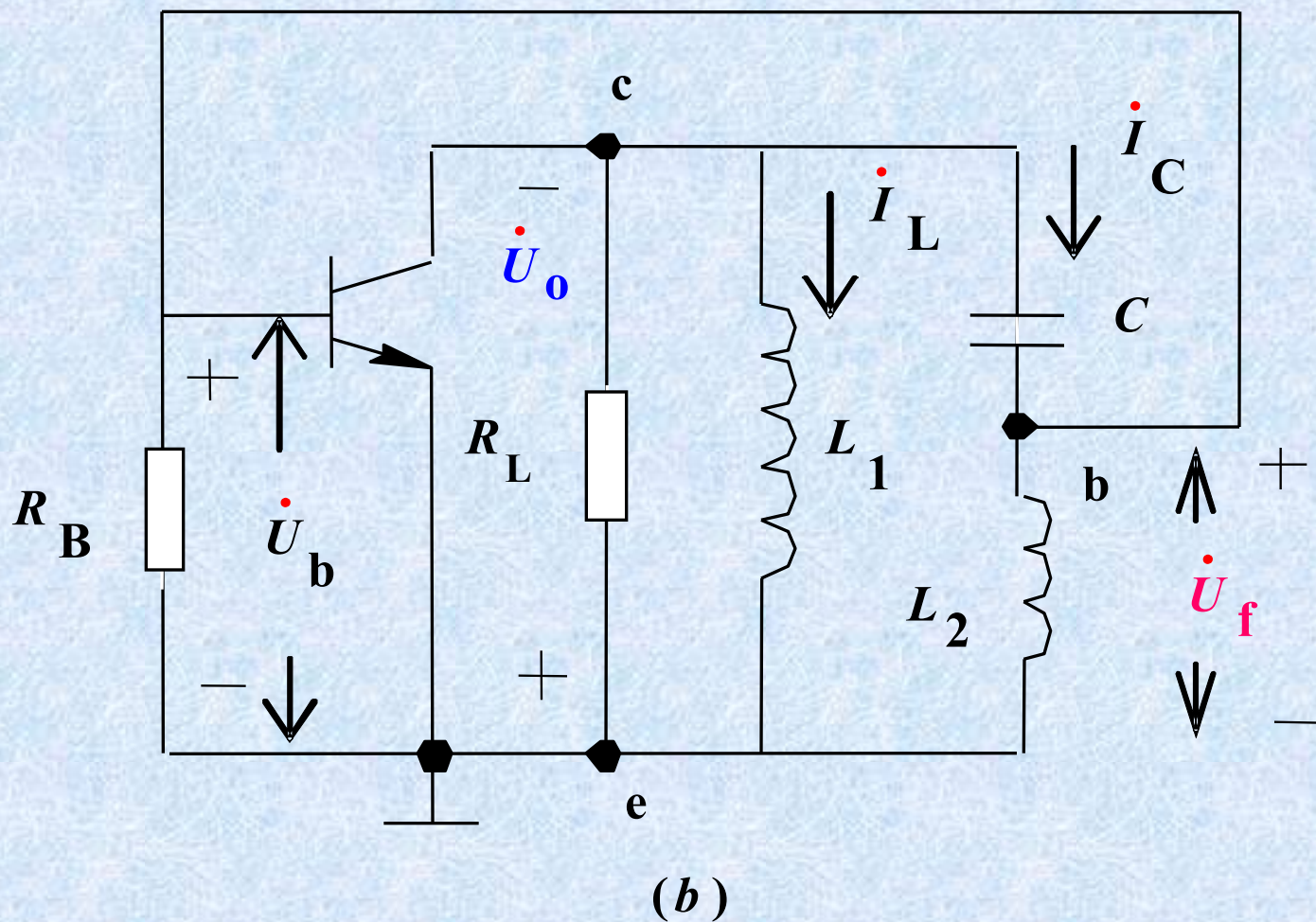
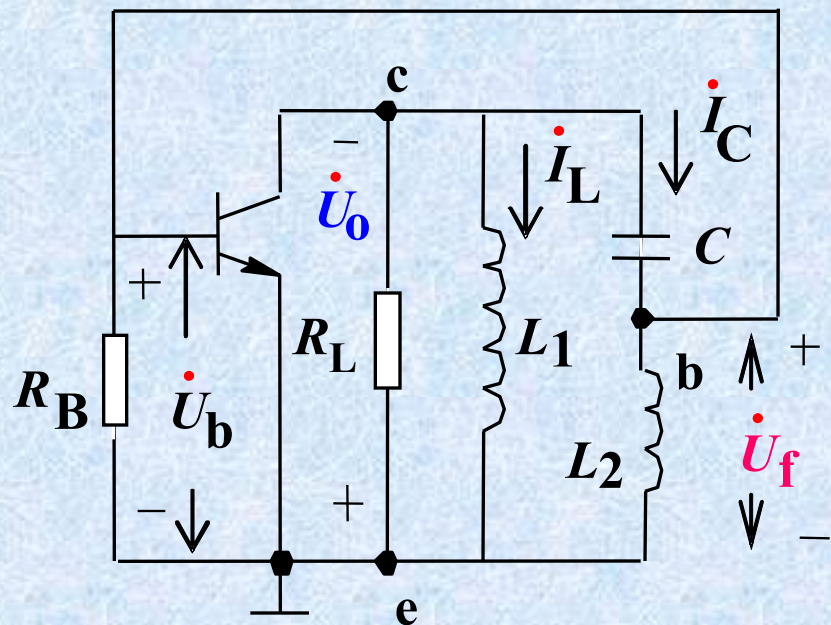


图10.26电感反馈式振荡电路及其交流通路



(b)

$$\omega_g = \frac{1}{\sqrt{L_1 C'}} = \frac{1}{\sqrt{C(L_1 + L_2)}}$$

注: L_1 与 L_2 之间无互感。

$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{\dot{I}_c j\omega L_2}{\dot{I}_L j\omega L_1} = -\frac{L_2}{L_1}$$

电感或电容反馈式振荡器是否满足 正反馈判断方法

交流通路中：“射同基反”规则

$E \rightarrow B, E \rightarrow C$: 同性性质电抗元件;

$B \rightarrow E, B \rightarrow C$: 异性性质电抗元件.

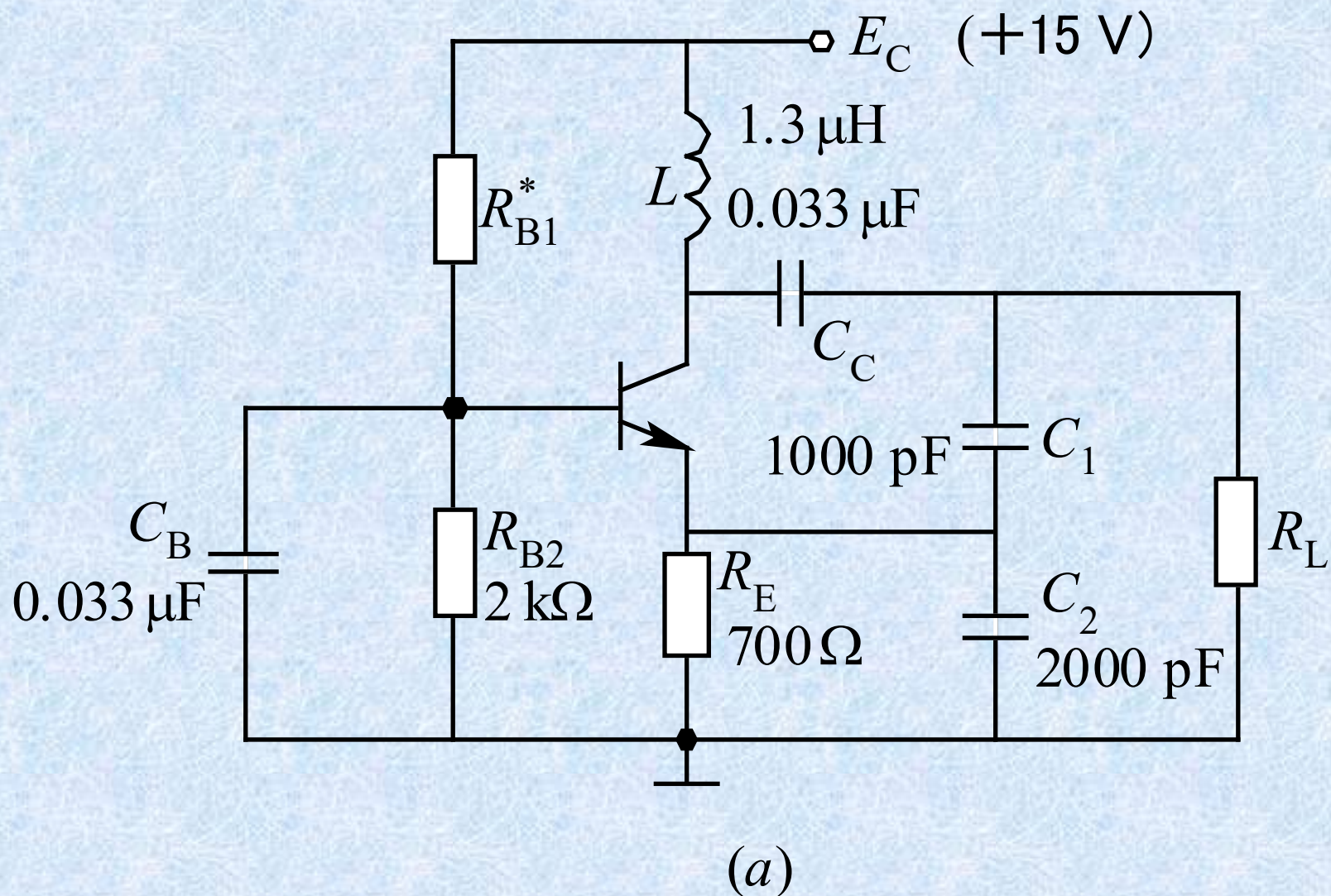
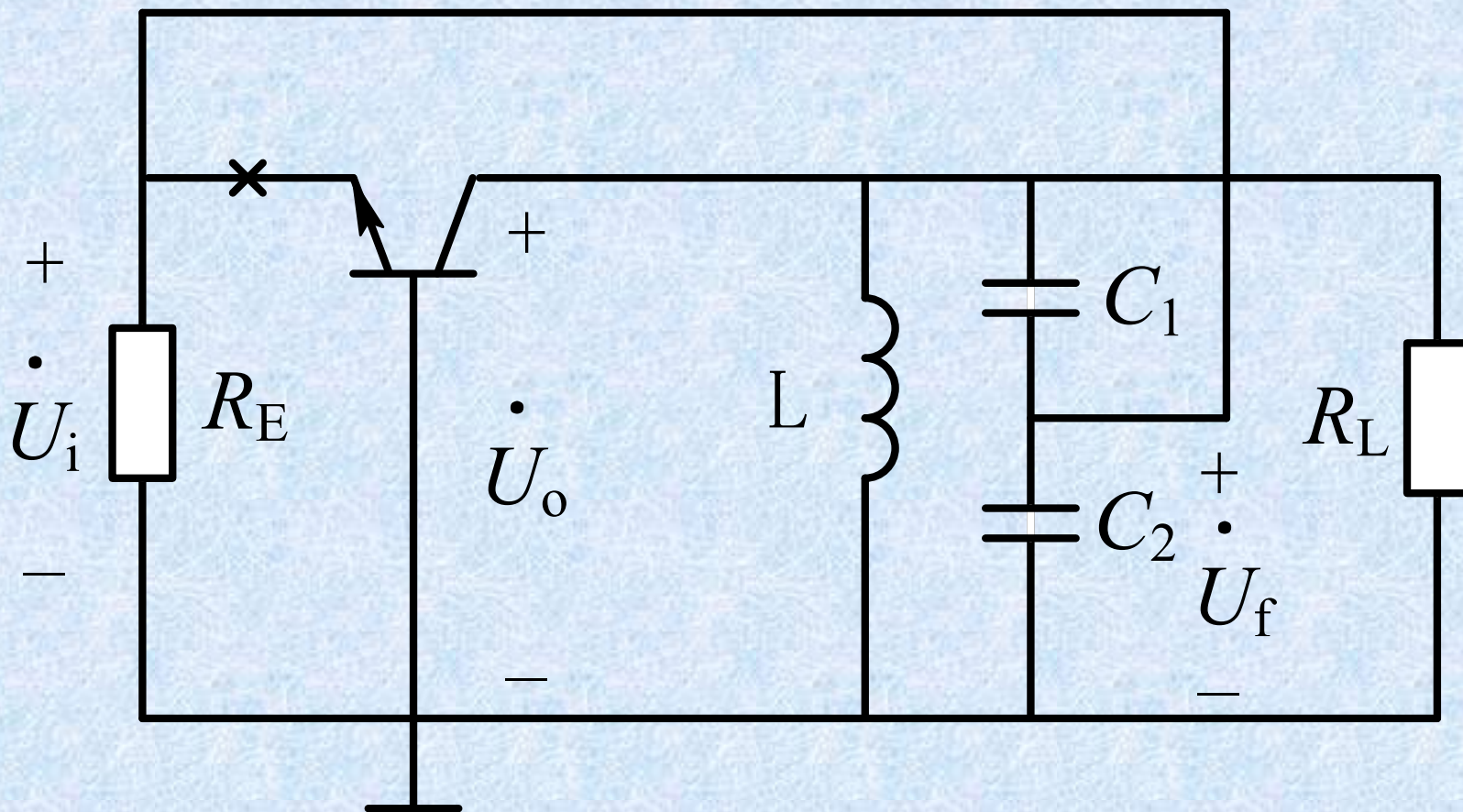


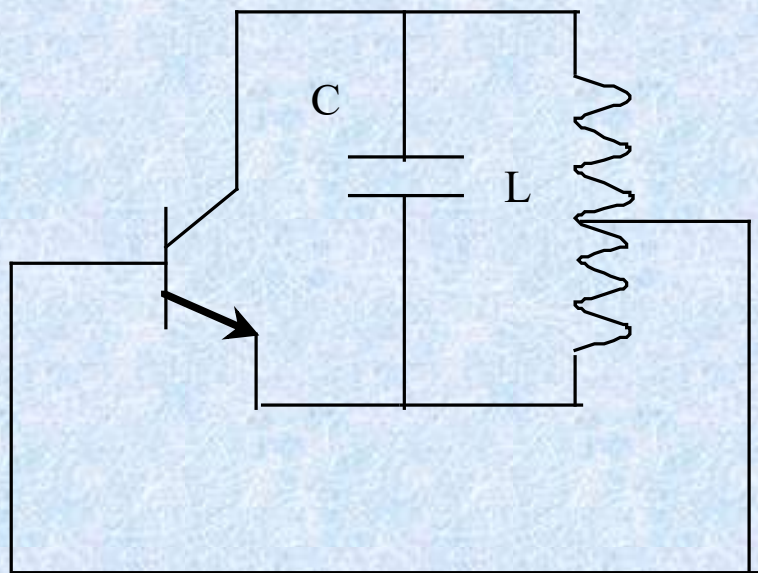
图10.25电容三点式振荡器及其交流通路 (CB)



(b)

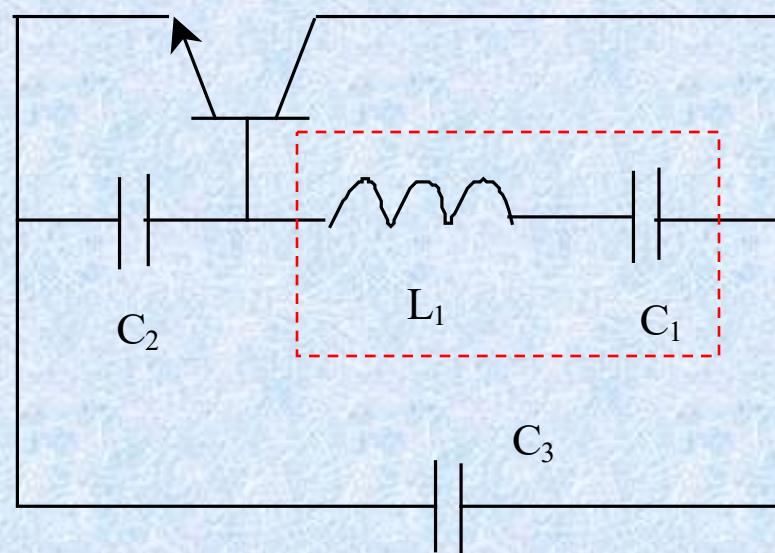
图10.25电容三点式振荡器及其交流通路（**CB**）

例1 在振幅条件已满足的前提下，用相位条件去判断如下振荡器是否能震荡？



(a)

否



(b)

电感三点式与电容三点式的比较

优点:

- (1) 高次谐波成分小, 输出波形好
- (2) 振荡频率可以做得很高

缺点:

频率不易调 (调L, 调节范围小)

优点:

频率易调 (调C)

缺点:

- (1) 输出波形差
- (2) 振荡频率不能太高



10.4 石英晶体振荡器

10.4.1 关于振荡频率的几个指标

1. 频率的准确性

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_i} = \frac{\omega_0 - \omega_i}{\omega_i}$$

测量值
设计值

2. 频率的稳定性

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$$

中波广播发射机: 10^{-5} ; 电视发射机: 10^{-7}

晶体振荡电路是利用石英晶体(石英晶体谐振器的简称,有时也称为晶振器)作为选频元件(经常是作为电感元件)构成的电路。主要用来产生振荡频率较高、且稳定度也很高的正弦信号,稳定度一般可达 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 的量级(LC 振荡器一般只达到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$, RC 振荡器就更低了)。其振荡原理与 LC 振荡电路产生正弦振荡的原理基本相同。

10.4.2 石英晶体的物理特性和电特性

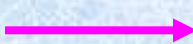
1. 石英谐振器的物理特性

1) 正压电效应

正压电效应：把机械能转化成电能。

2) 反压电效应

反压电效应：把电能转化成机械能。

交变电场  机械形变振动.



通常机械振动振幅和外加交变电场的振幅都非常微小。

但 振动频率却很稳定。

当外加交变电压的频率与晶片的固有频率(决定于晶体的尺寸)相等时,机械振动的幅度将急剧增加,这种现象称为压电谐振,因此石英晶体又称为石英晶体谐振器。

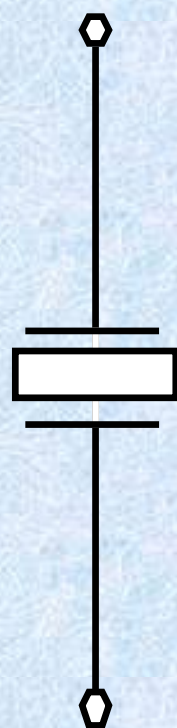
利用石英晶体作振荡用,可以得到稳定度非常高的频率,因为其谐振频率由晶体的几何尺寸决定,而其几何尺寸几乎不随温度而变。

谐振在晶体的基音(Fundamental)

或奇次泛音(Overtone)(3、5、7次泛音)。

2. 石英谐振器的电特性

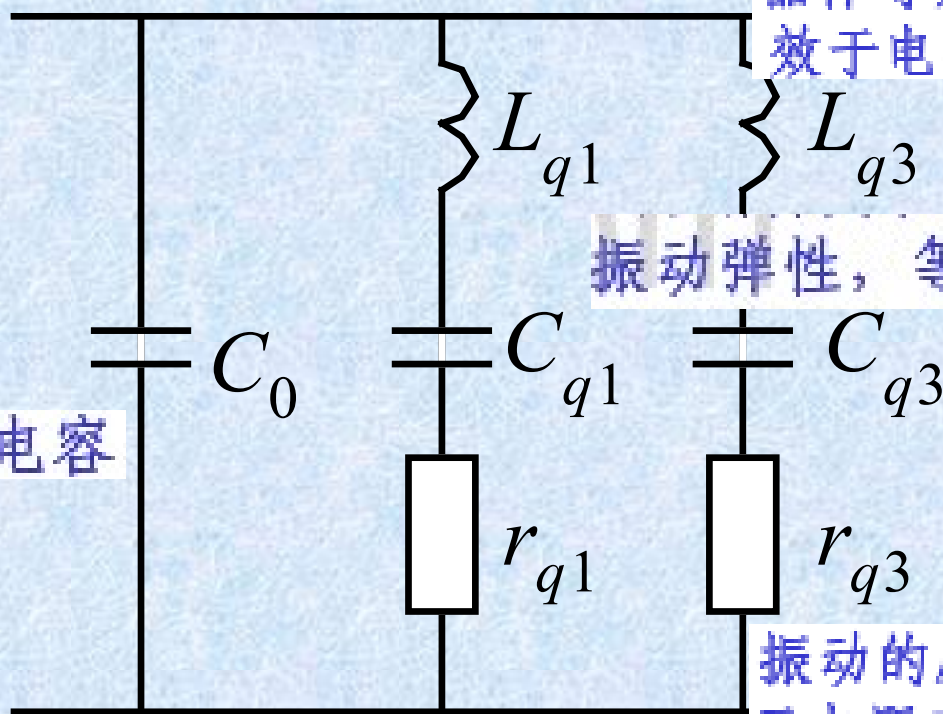
频率丰富的谐振系统



晶体

两金属片间电容

(a)



晶体等效质量惯性，等效于电感

振动弹性，等效于电容

振动的摩擦损耗，等效于电阻 R

(b)

图10.30 石英晶体的等效电路和电抗特性
(a)晶体符号；(b)某振动模式的电等效电路

阻抗即电阻与电抗的总合，用数学形式表示为：

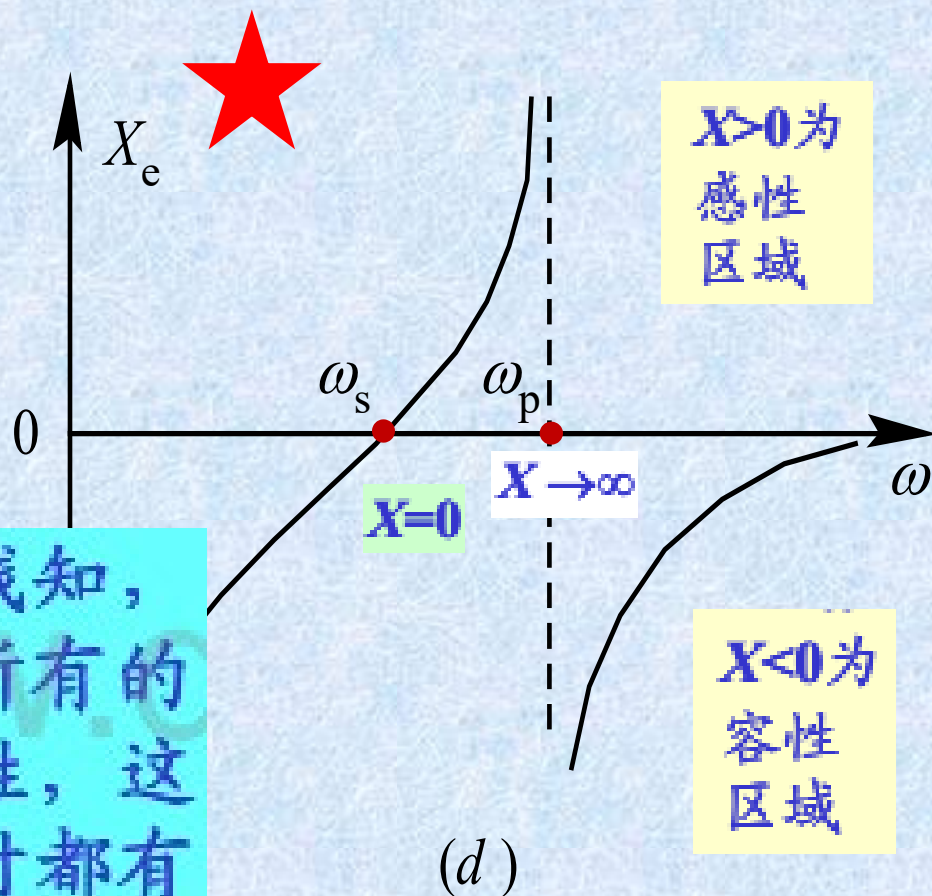
$$Z = R + jX$$

Z 即阻抗，单位为欧姆 Ω

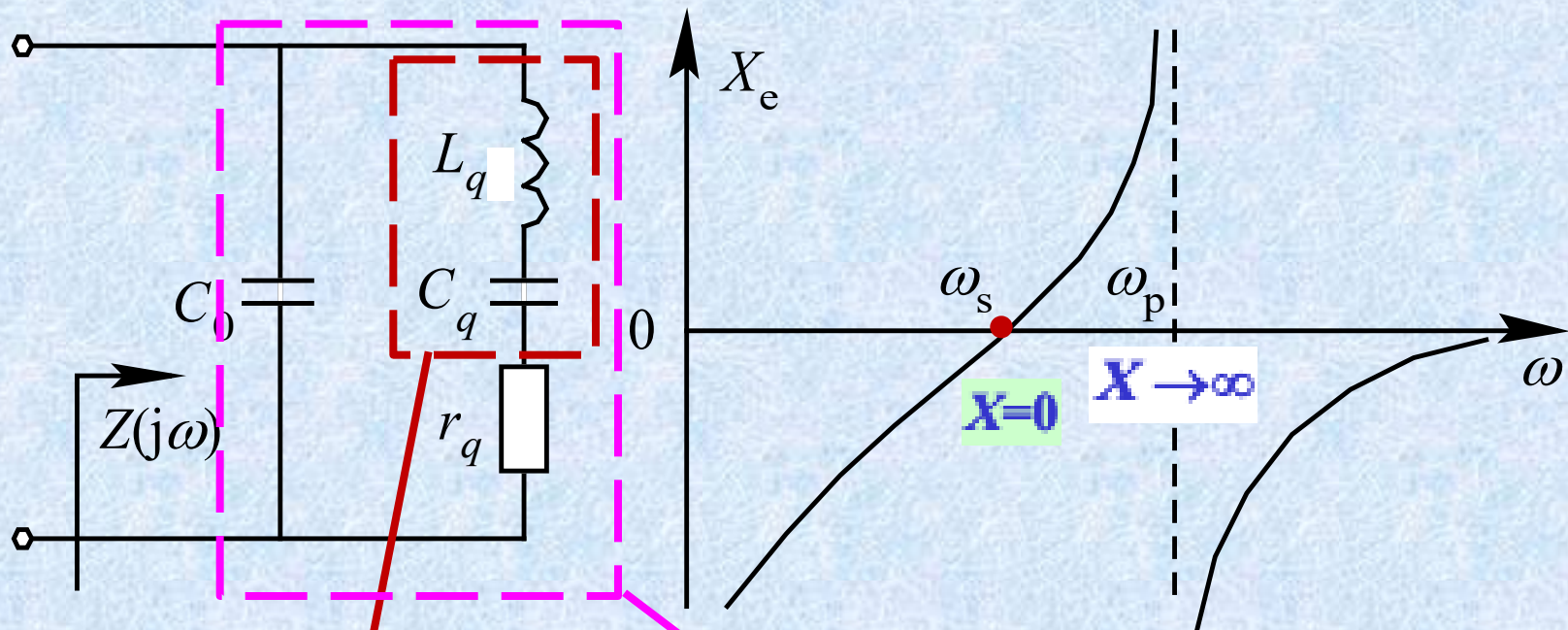
R 为电阻，单位为欧姆 Ω

X 为电抗，单位为欧姆 Ω

由晶体频率特性曲线知，除了 ω_s 之外，晶体对所有的频率均呈现容性或感性，这些频率的信号在反馈时都有相移并被衰减。只有的 $\omega = \omega_s$ 频率令晶体的阻抗为0，反馈支路呈现纯电阻性质不产生相移。



路； (d)电抗特性



(c)

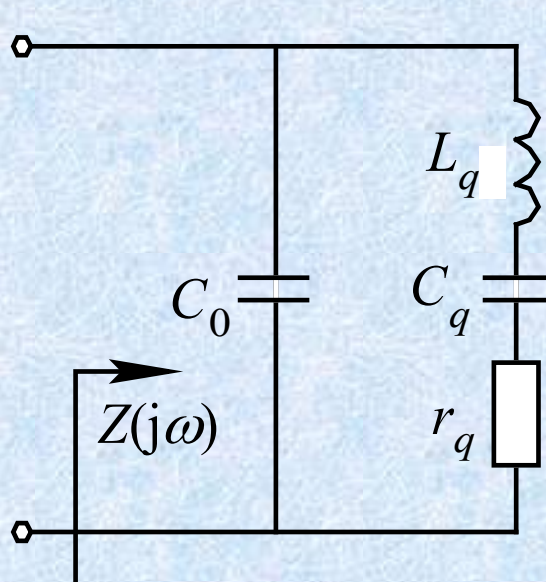
(d)

串联支路的谐振频率

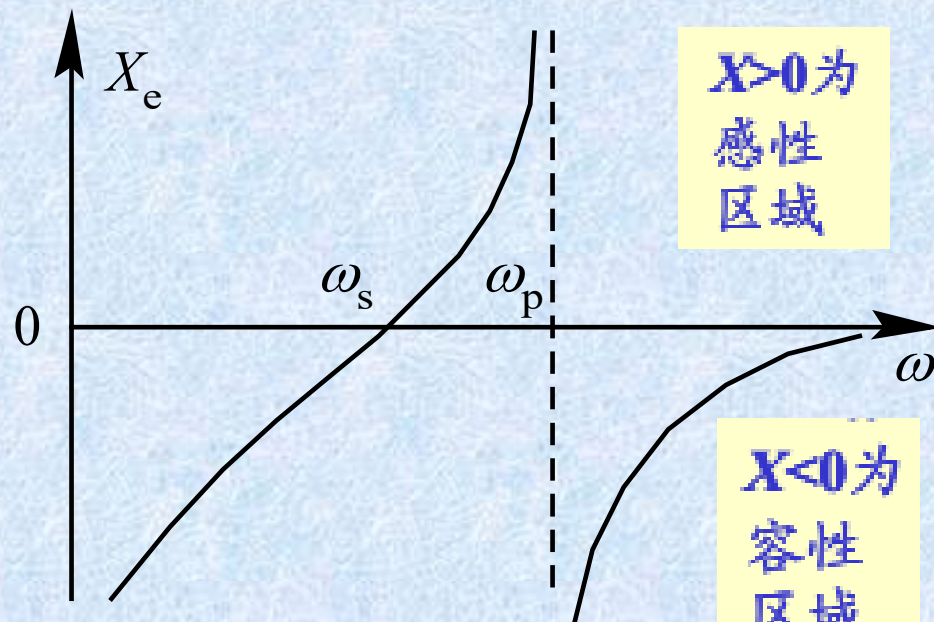
$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_q C_q}}$$

并联回路的谐振频率

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_q \frac{C_0 C_q}{C_0 + C_q}}}$$



(c)



(d)

$$\Delta\omega = \omega_p - \omega_s = \omega_s \left(\sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0}} - 1 \right)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_s} \approx \frac{C_q}{2C_0} \quad \text{其值约为 } 10^{-3} \text{ 量级}$$

两个频率非常接近。

由于感性区间很窄，所以选频特性很好。

10.4.3 串联型石英晶体振荡器

串联型石英晶体振荡器把石英晶体用作选频短路线



由图可得，晶体和电阻 R 组成了反馈回路。

5

显然晶体在此不是作为 LC 振荡的元件。

由晶体频率特性曲线知，除了 ω_s 之外，晶体对所有的频率均呈现容性或感性，这些频率的信号在反馈时都有相移并被衰减。只有频率 ω_s 令晶体的阻抗呈现纯电阻性质不产生相移。

如果是 ω_s 信号，则晶体的阻抗 $X=0$ ，信号不产生相移。

通过调节电阻 R 改变反馈量，可得到理想的正弦波。

10.4.4 并联型石英晶体振荡器

并联型石英晶体振荡器把石英晶体用作电感元件

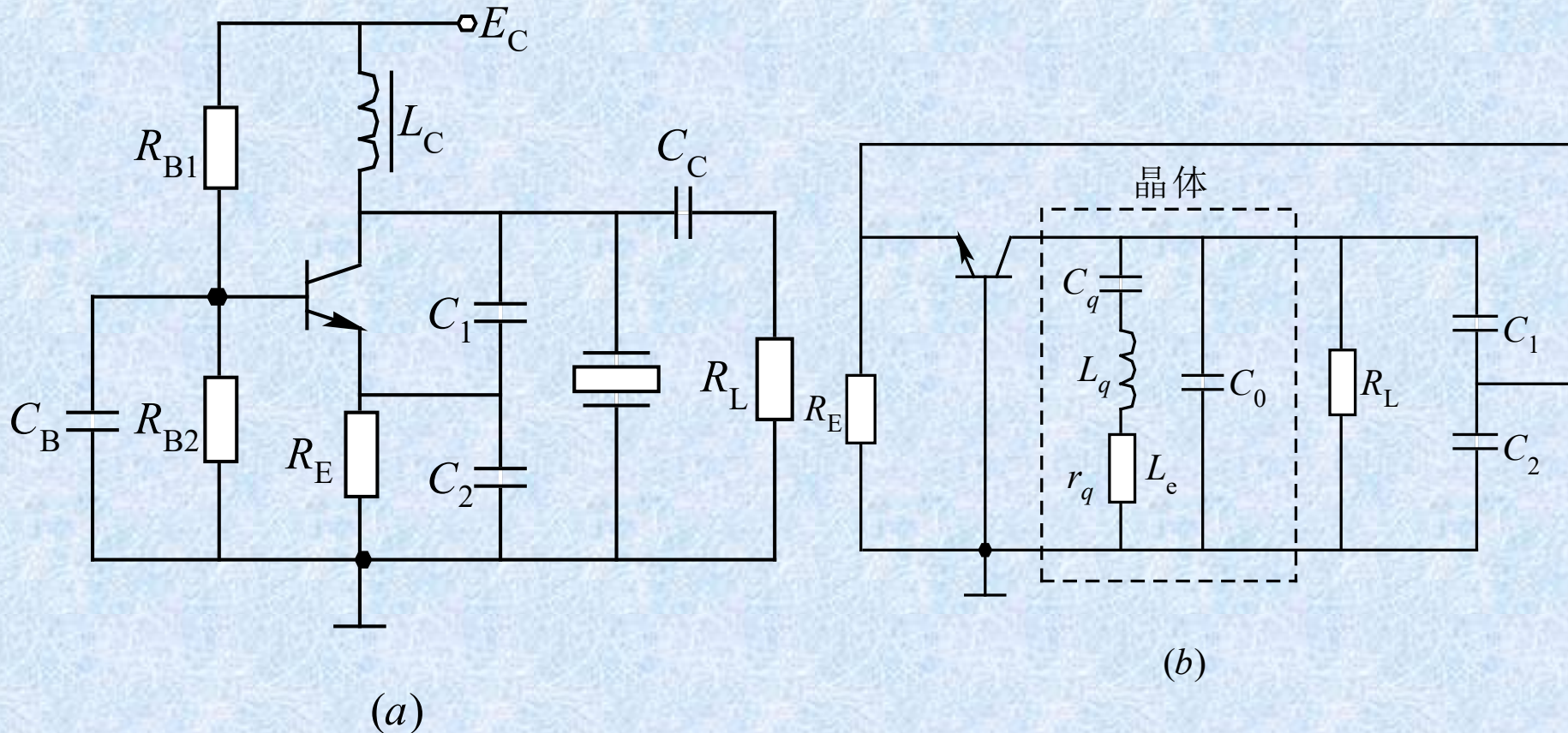
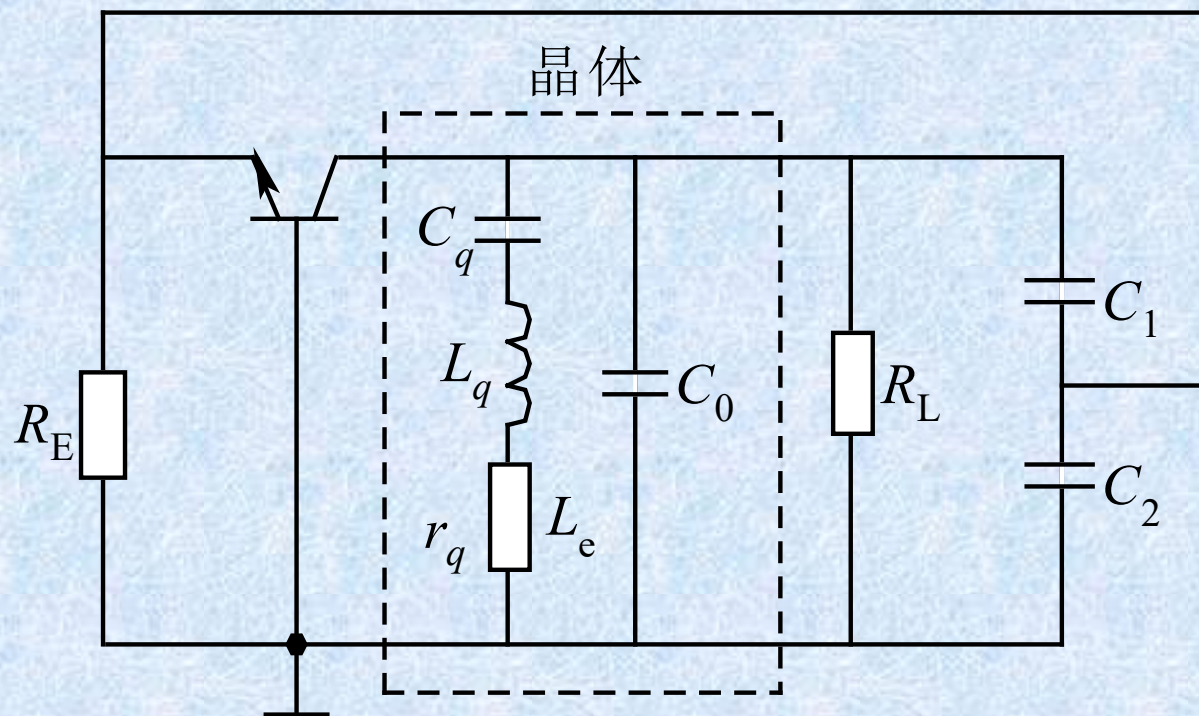


图10.32 并联型石英晶体振荡器
(a)原理电路； (b)交流通路



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

(b)

$$\omega_g = \frac{1}{\sqrt{L_q \frac{C'_0 C_q}{C'_0 + C_q}}}$$

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

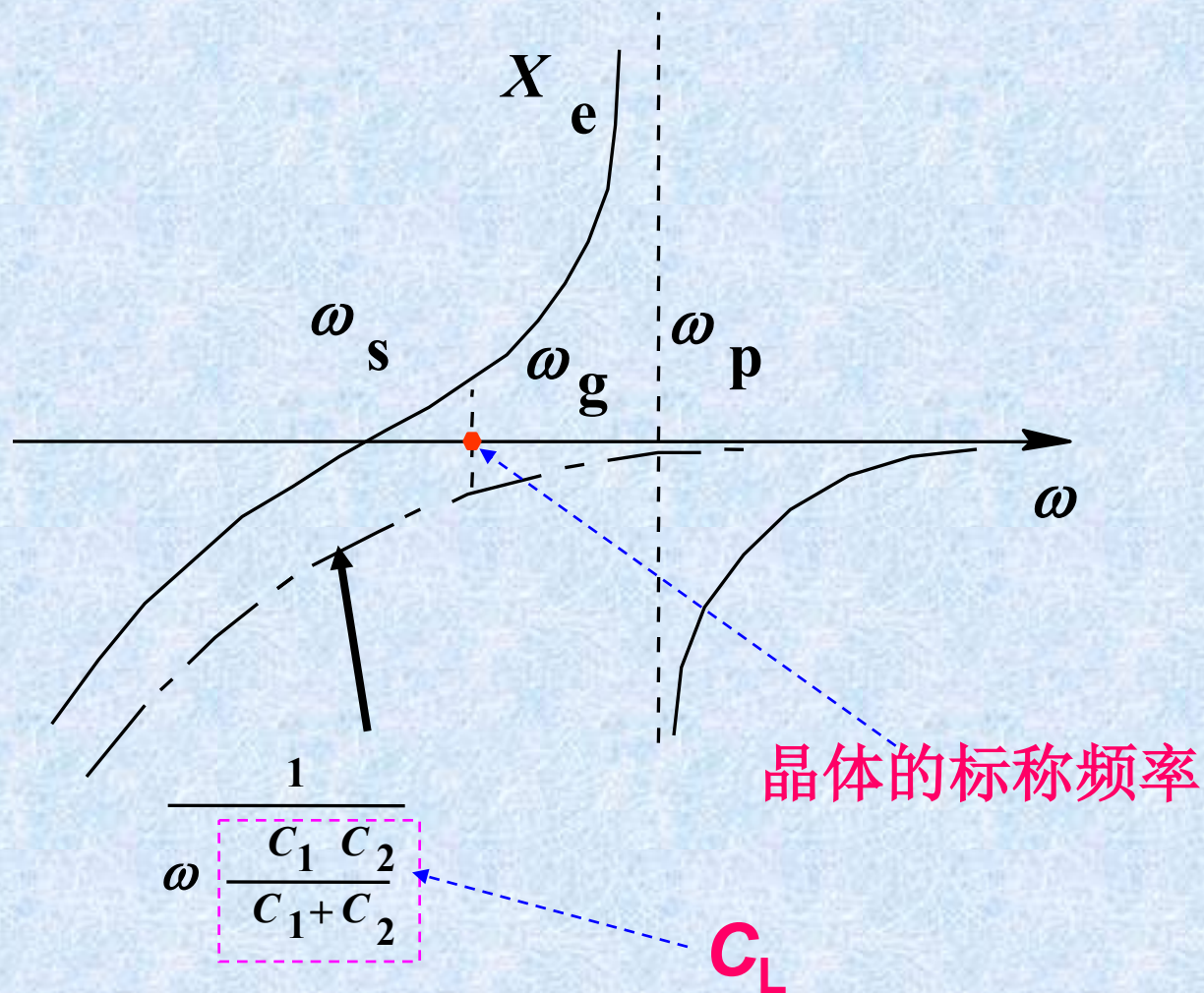


图10.32 并联型晶体振荡器振荡频率的图解确定

[例题] 对图10-19晶体振荡器，已知晶体串联谐振频率为10MHz.

(1) 说明该电路属于哪种形式的晶体振荡电路。

(2) 求所需L值.

(3) 求等幅振荡时的 R_2 值.

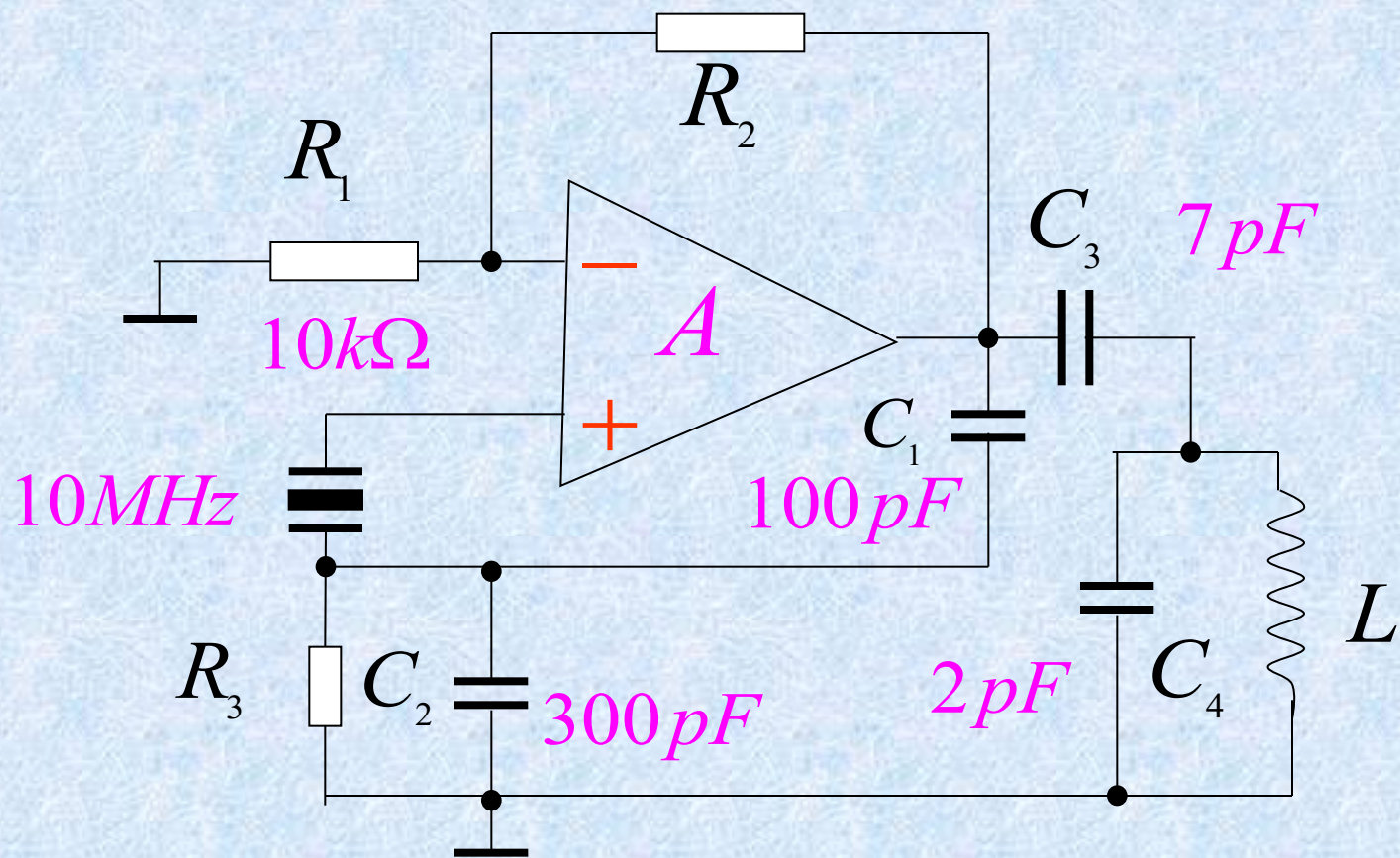


图 10-19 晶振电路

解:(1) 该电路为串联型晶体振荡器, 晶体等效为短路元件, C_2 为反馈电容, C_2 两端反馈电压与运放输出端电压相同, 在晶体串联谐振频率满足正反馈条件。

(2). 由于 $C_3 \ll C_1, C_3 \ll C_2$ 回路谐振频率 f_0 应为 10MHz。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3 + C_4)}} \quad \text{求得:}$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 (C_3 + C_4)} = \frac{1}{4\pi^2 \times 10^{14} \times (2 + 7) \times 10^{-12}} = 28\mu H$$

(3) 由图10-19

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad F_u = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

根据振荡器振幅平衡条件 $A_u = \frac{1}{F_u}$

得到 $1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{C_2}{C_1} = 4,$

因此: $R_2 = 3R_1 = 30k\Omega$

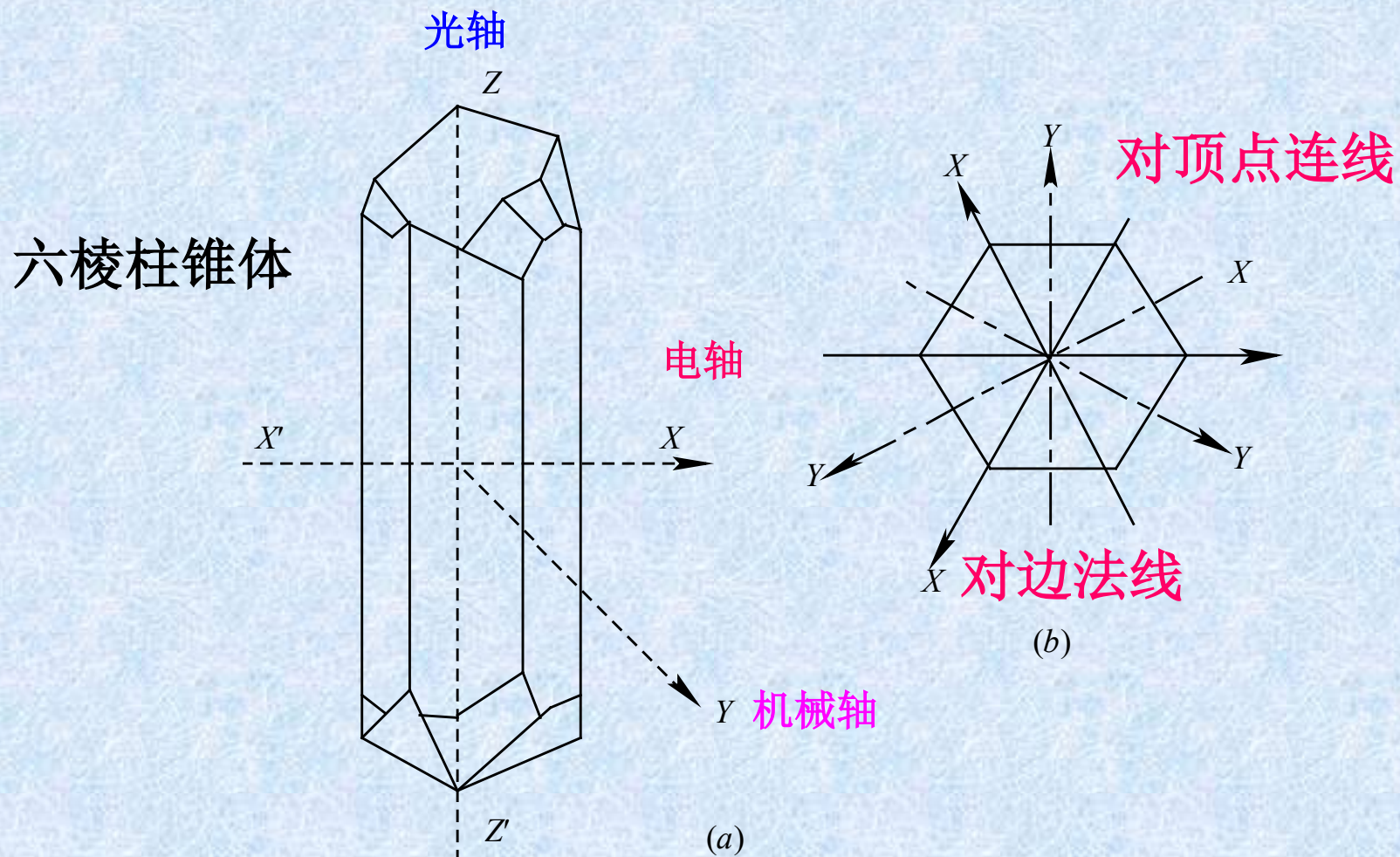


图10.28 晶体的形状及横断面 (a)晶体外形; (b)横断面

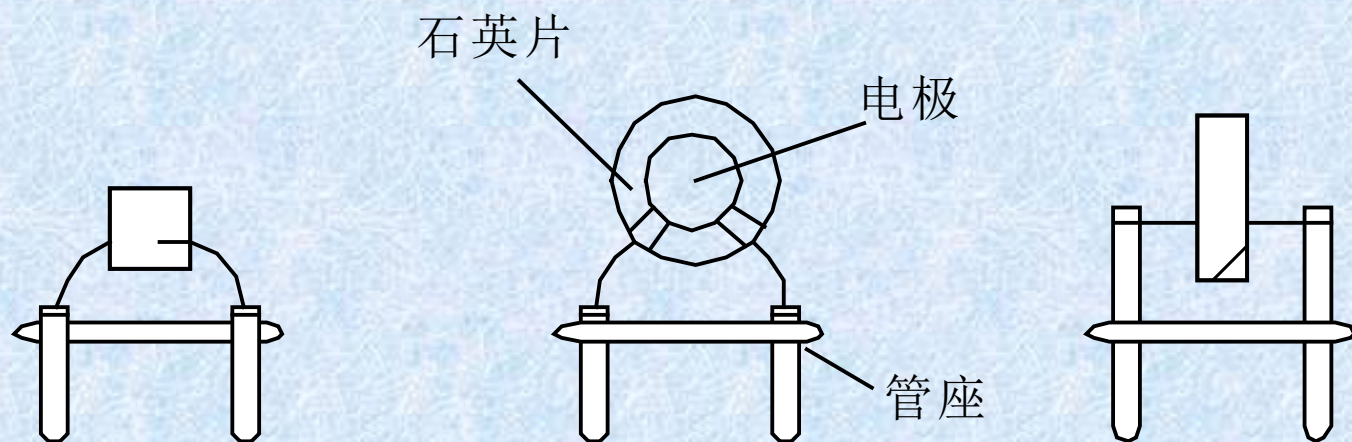


图10.29 石英谐振器的内部结构