

三点式LC振荡器

改进型电容三点式振荡器

振荡器的频率稳定问题

石英晶体谐振器

石英晶体振荡器电路

陶瓷振子和陶瓷振子电路

第四章 正弦波振荡器

通信电子电路

Copyright © 2006 hxf & yhx All Rights Reserved



本章内容



[返回总目录](#)

4.1 概述

4.2 反馈型正弦波自激振荡器基本原理

4.3 三点式LC振荡器

4.4 改进型电容三点式振荡器

4.5 振荡器的频率稳定问题

4.6 石英晶体谐振器

4.7 石英晶体振荡器电路

4.8 陶瓷振子和陶瓷振子电路

4.9 单片集成振荡电路E1648



本章重点与难点

(一) 本章重点

1. 振荡器的种类及应用；
2. 三点式振荡器；
3. 改进型电容三点式振荡器，即克拉泼电路和西勒电路；
4. 振荡器的频率稳定问题；
5. 压电效应，石英晶体谐振器；石英晶体振荡器电路。

(二) 本章难点

克拉泼电路和西勒电路



4.1 概 述

振荡器是指在没有外加信号作用下的一种自动将直流电源的能量变换为一定波形的交变振荡能量的装置。



一、正弦波振荡器的应用

1. 在信息传输系统的各种发射机中，就是把主振器（振荡器）所产生的载波，经过放大、调制而把信息发射出去的。

2. 在超外差式的各种接收机中，是由振荡器产生一个“本地振荡”信号，送入混频器，才能将高频信号变成中频信号。

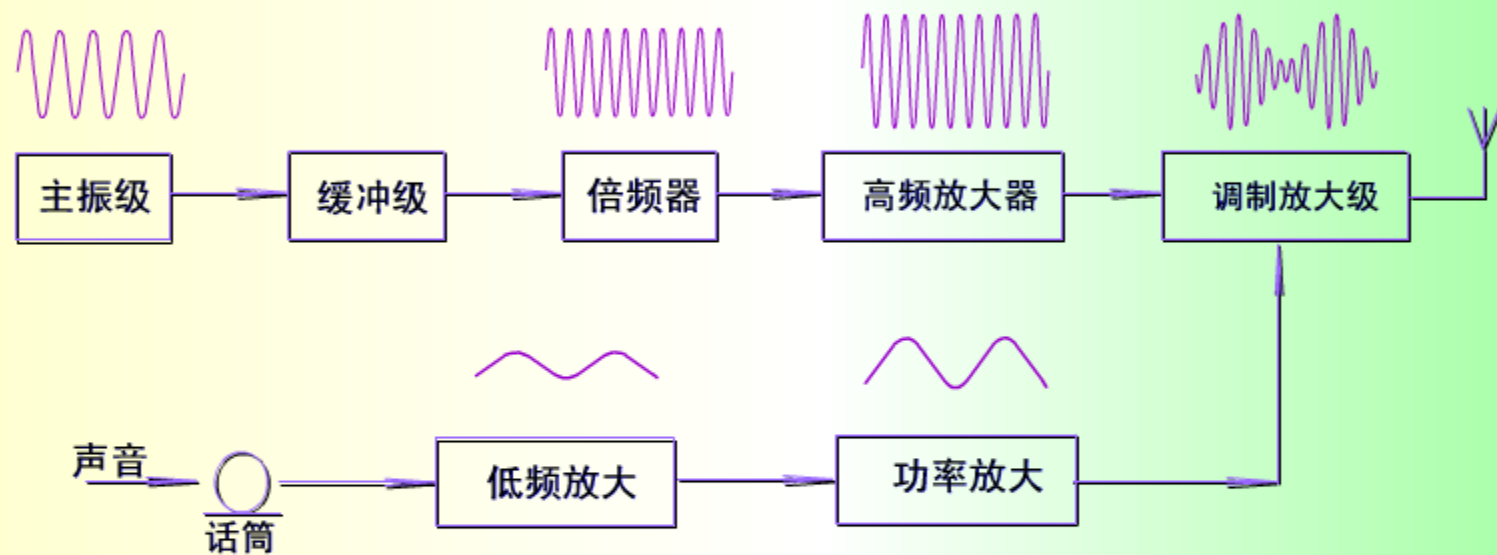


图1-4 无线电广播发射调幅系统框图

YHZ/WXQ

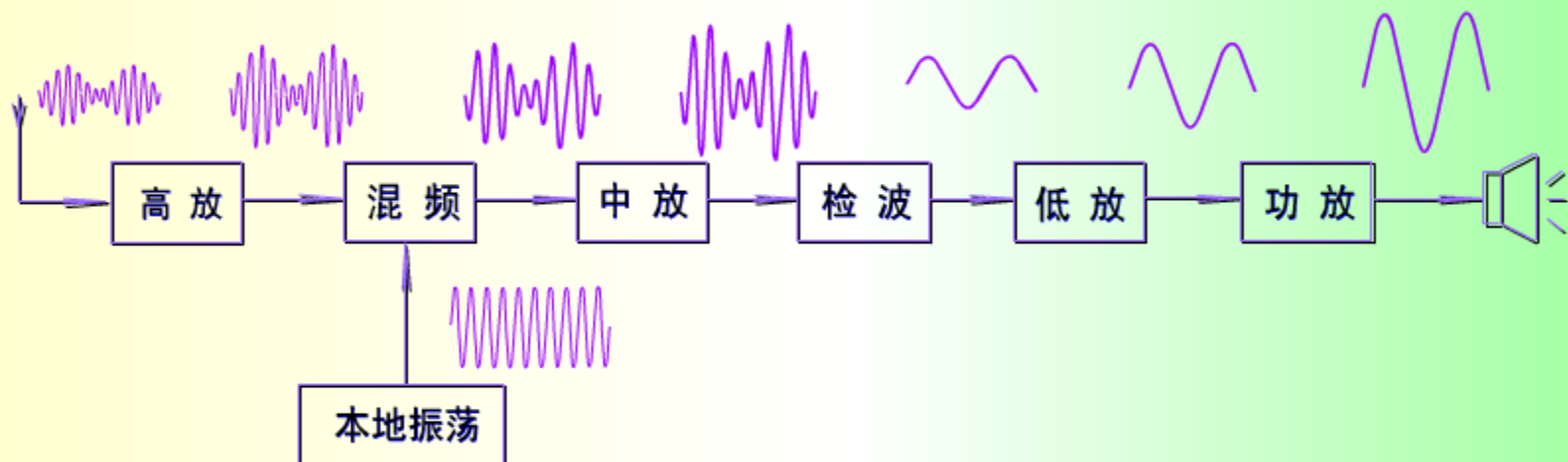
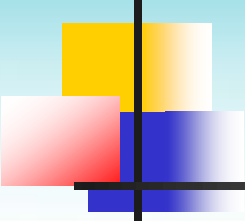


图1-5 超外差接收机组组成方框图



3. 在研制、调测各类电子设备时，常常需要信号源和各种测量仪器，在这些仪器中大多包含有振荡器。

例如高频信号发生器、音频信号发生器、 Q 表以及各种数字式测量仪表等。

4. 在工业生产中的高频加热、超声焊接以及电子医疗器械也都广泛应用振荡器。

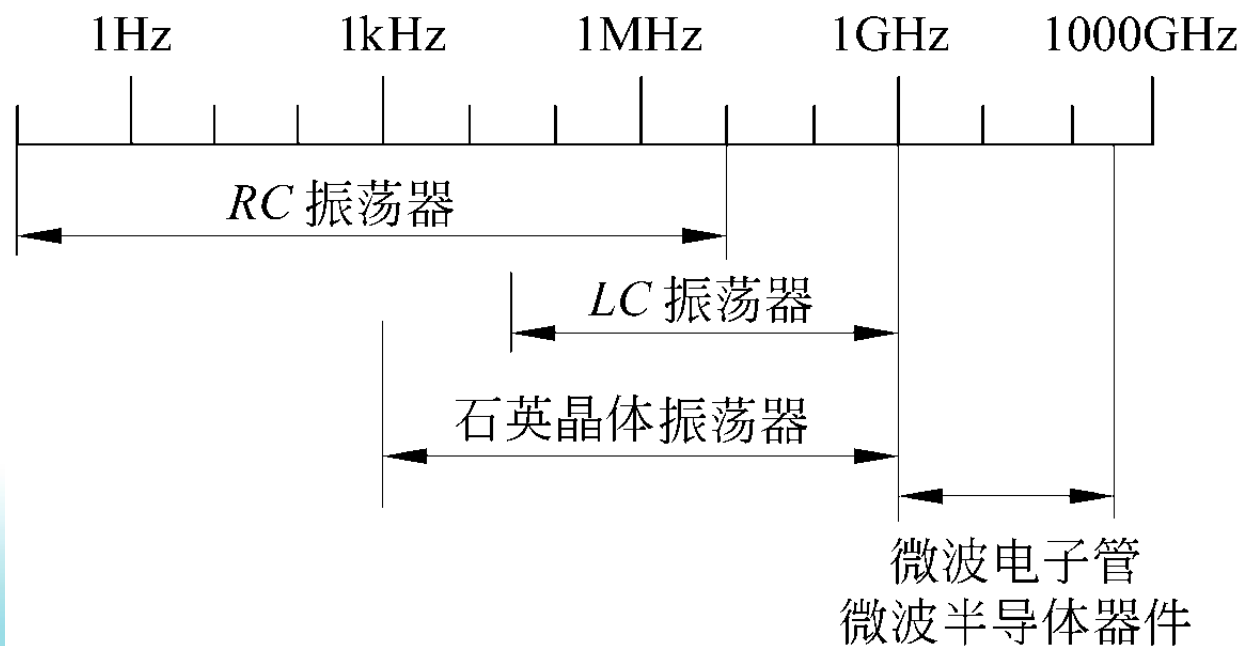
可见正弦波振荡器在电子技术领域里有着广泛的应用。

二、分类

按波形分：正弦波振荡器和非正弦波振荡器

按工作方式分：负阻型振荡器和反馈型振荡器

按选频网络所采用的原件分：LC振荡器、RC振荡器和晶体振荡器等类型

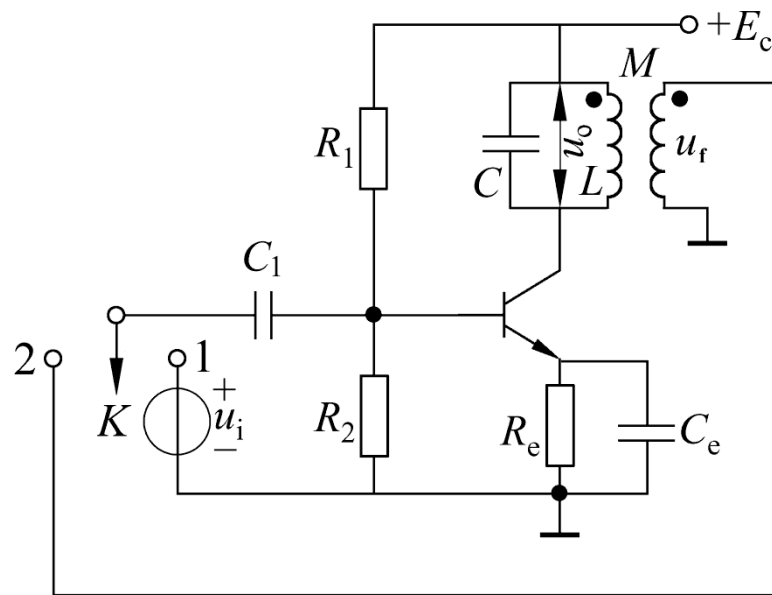


4.2 反馈型正弦波自激振荡器基本原理

4.2.1 从调谐放大到自激振荡

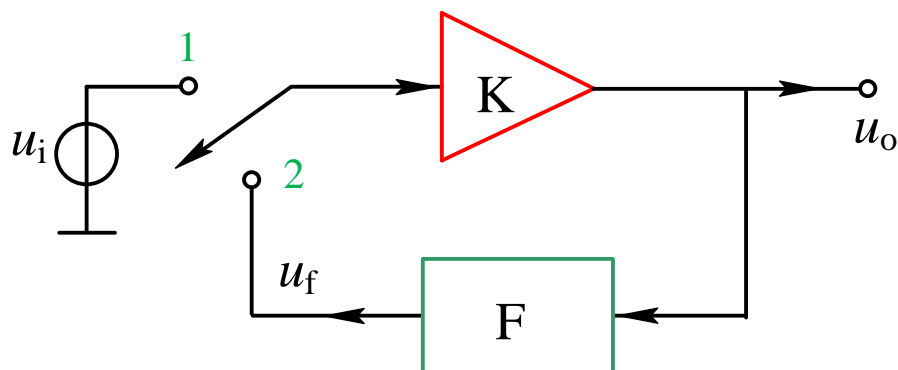
实际中的反馈振荡器是由反馈放大器演变而来。

开关K拨向“1”时，电路为调谐放大器。调整互感 M 及同名端以及回路参数，可以使 $u_F = u_i$ 。



此时，若将开关K快速拨向“2”点，则集电极电路和基极电路都维持开关K接到“1”点时的状态。这时，调谐放大器就变为自激振荡器。

框图



若 $u_f = u_i$ ，放大电路依靠来源于输出端的反馈电压工作。此时即使没有输入信号，放大器仍有电压输出，放大器变为振荡器。

由于 $u_f = \dot{F} \cdot u_o = \dot{F} \cdot \dot{K} \cdot u_i$ ，因此 $\dot{K} \cdot \dot{F} = 1$ 。

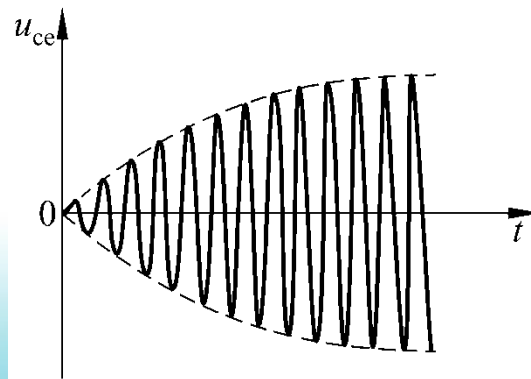
4.2.2 振荡的建立和起振条件

1. 振荡的建立过程

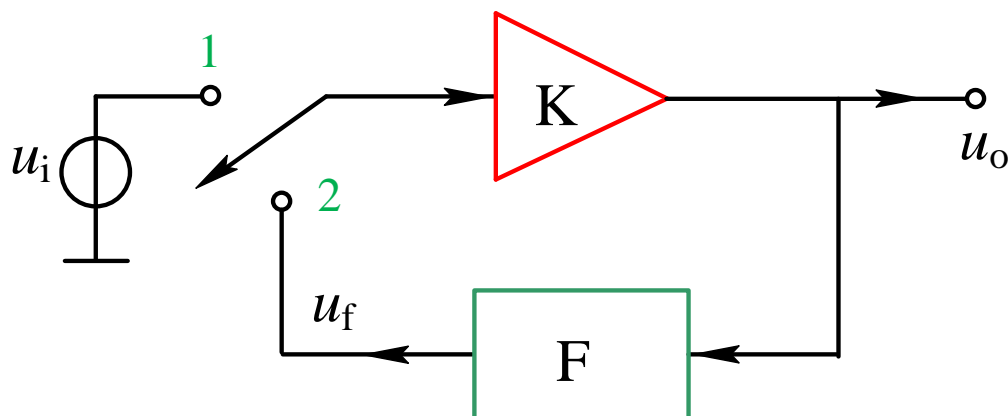
在电源开关闭合的瞬间，存在各种电的扰动。突变的电流包含着许多谐波成分，它们通过LC谐振回路，在它两端产生电压，并通过互感耦合变压器反馈到基级回路，这就是激励信号。

起始振荡信号十分微弱，但是由于不断对它进行放大—选频—反馈—再放大等多次循环，于是一个与振荡回路固有频率相同的自激振荡便由小到大地建立起来。

由于晶体管特性的非线性，振幅会自动稳定到一定的幅度。因此振荡的幅度不会无限增大。



2.起振条件



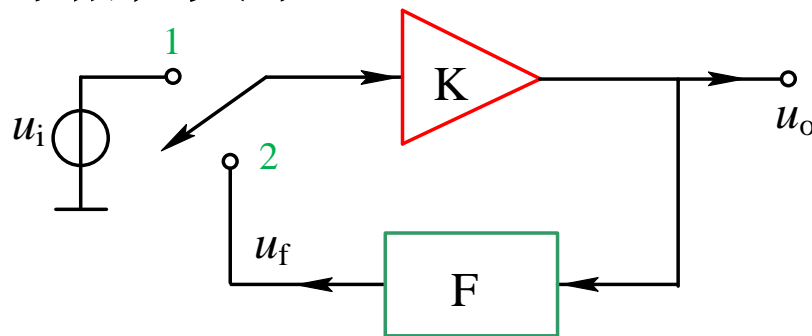
起振时 $u_f > u_i$ ，因此，振荡器的起振条件为

$$\dot{K}\dot{F} > 1 \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} KF > 1 \\ \varphi_K + \varphi_F = 2n\pi \quad (n = 0, \pm 1, \dots) \end{cases}$$

物理意义：**振幅起振条件**要求反馈电压幅度要一次比一次大，而**相位起振条件**则要求环路保持**正反馈**。

4.2.3 振荡器的平衡条件

所谓平衡条件是指振荡已经建立，为了维持自激振荡必须满足的幅度与相位关系。



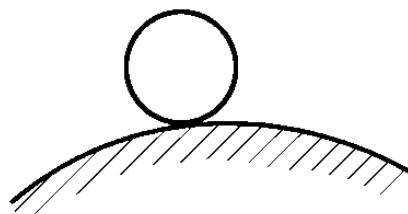
平衡时 $u_f = u_i$ ，因此，振荡器的平衡条件为

$$\dot{K}\dot{F} = 1 \quad \rightarrow \quad \begin{cases} KF = 1 & \text{振幅平衡条件} \\ \varphi_K + \varphi_F = 2n\pi \quad (n = 0, \pm 1, \dots) & \text{相位平衡条件} \end{cases}$$

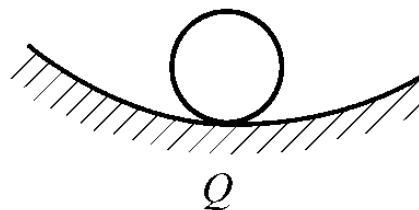
在平衡条件下，反馈到放大管的输入信号正好等于放大管维持振荡所需要的输入电压，从而保持反馈环路各点电压的平衡。

4.2.4 振荡器的稳定条件

1. 稳定平衡和不稳定平衡



(a) 不稳定平衡



(b) 稳定平衡

2. 振幅稳定条件

在平衡点附近，放大倍数随振幅的变化特性具有负的斜率。

3. 相位稳定条件

相位稳定条件指相位平衡条件遭到破坏时，线路本身能重新稳定在原有频率上的条件。相位稳定条件是：相位特性曲线在工作频率附近的斜率是负的。



4.2.5对振荡三条件的讨论

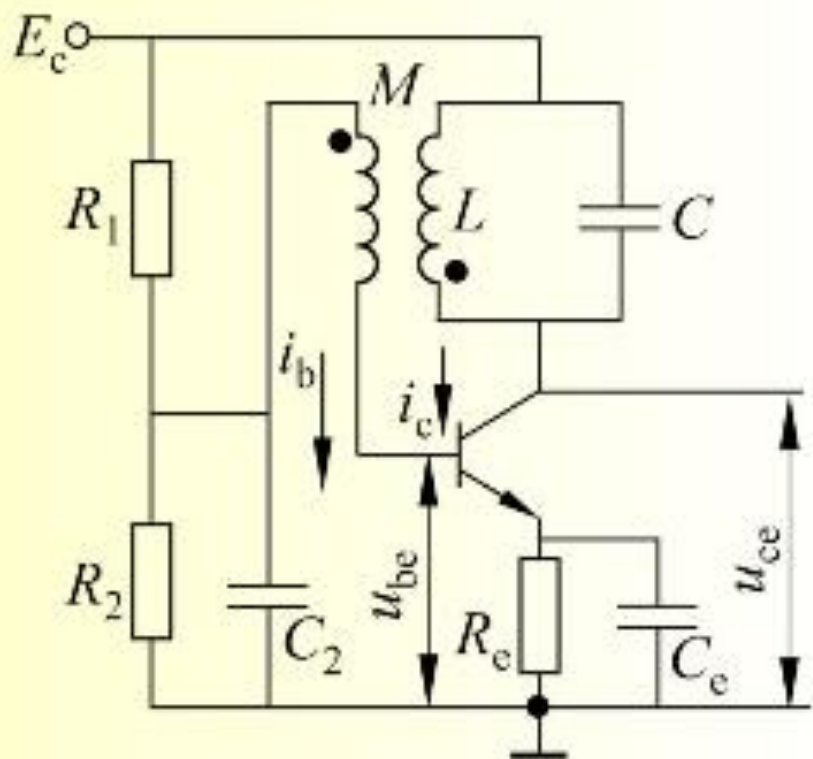
1.三个条件都必须满足，缺一不可。在实际振荡电路中，必须满足起振和平衡条件，而稳定条件则是隐含在电路结构中。

2.如果电路结构合理，只要满足起振条件，就能自动进入平衡状态，产生持续振荡。

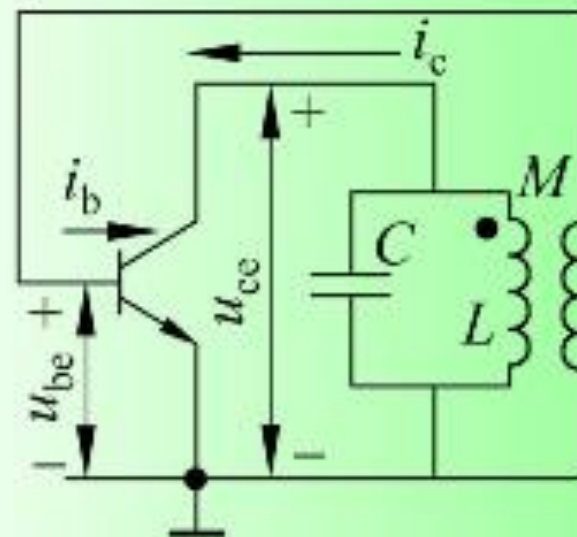
3.振荡器的分析可分为定性和定量两个方面。

定性分析判断电路结构是否合理，包括电路中是否有选频网络，选频网络的相频特性是否为负斜率，电路中是否具有正反馈。

定量分析仅需分析电路是否满足起振条件，由于起振时，振荡管处于线性放大状态，且输入信号很微弱，可以采用微变等效电路的方法进行分析。



(a) 原理电路



(b) 交流等效电路

图4-3 互感反馈振荡器



4.3 三点式 LC 振荡器

一、组成原理

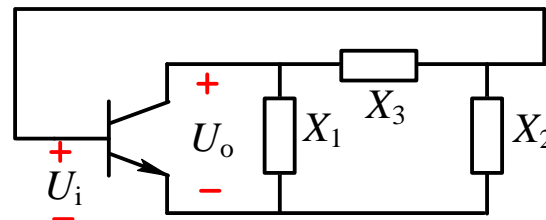
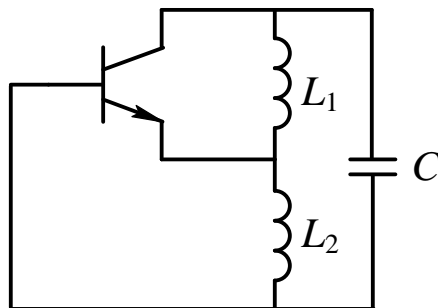
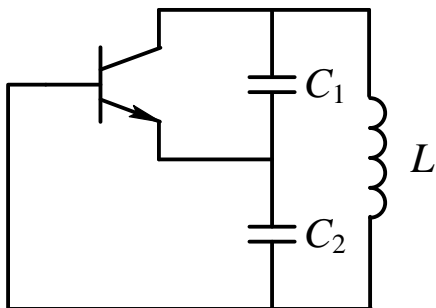
LC 回路引出三个端点，分别同晶体管的三个电极相连的振荡器，称三点式振荡器。

分为电容三点式和电感三点式。

三点式LC振荡器组成法则（相位平衡条件）

1. 电路

LC回路引出三个端点，分别同晶体管的三个电极相连，分电容三点式和电感三点式两种。



2. 特点

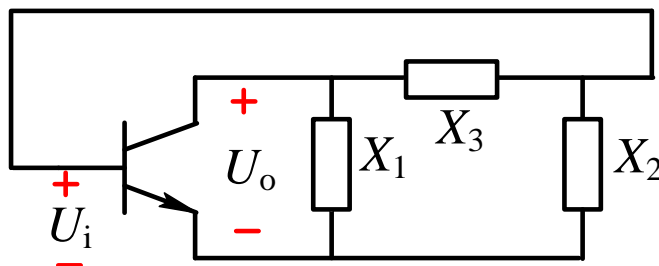
射同集（基）反——与射极相连的元件电抗性质相同，与集电极、基极相连的元件的电抗性质相反。

证明

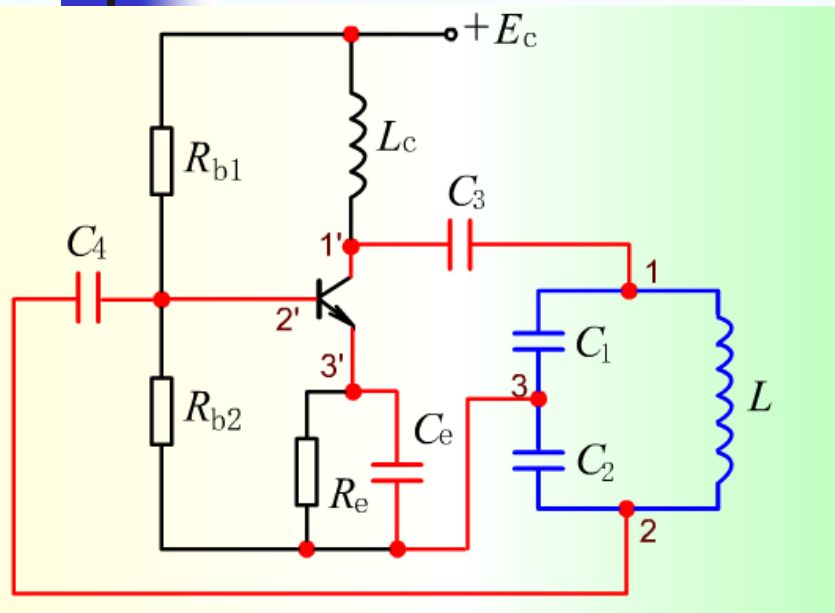
忽略三极管输入和输出阻抗，且回路品质因数足够高，则当回路谐振，即 $X_1 + X_2 + X_3 = 0$ 时，回路呈纯阻。

$$U_f = \frac{jX_2}{j(X_2 + X_3)} \cdot U_o = -\frac{X_2}{X_1} U_o$$

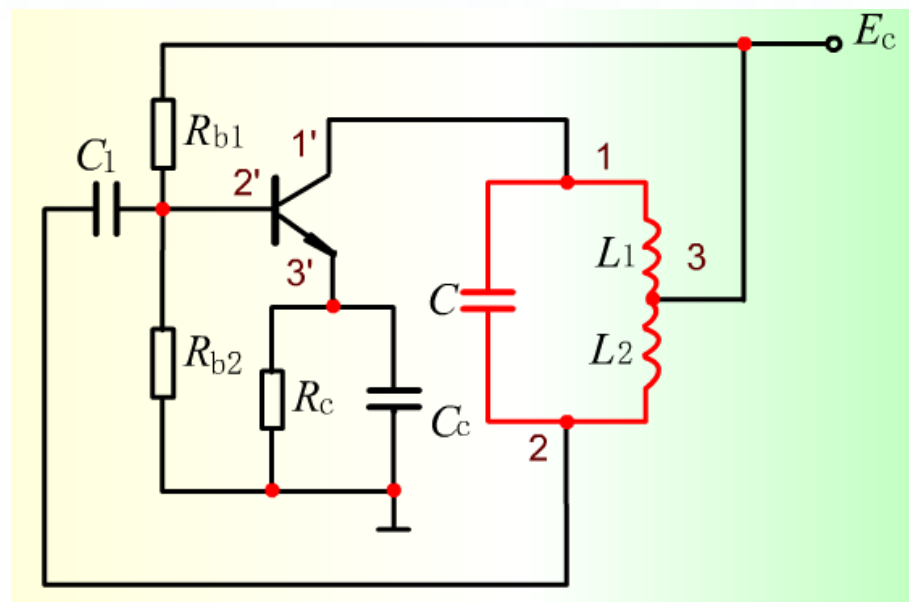
为了满足相位平衡条件， X_2 与 X_1 必须为同性质电抗。



(1) 电容三点式



(2) 电感三点式



射同集（基）反——与射极相连元件电抗性质相同，与集电极、基极相连元件的电抗性质相反。该规律对于三点式电路有普遍意义。

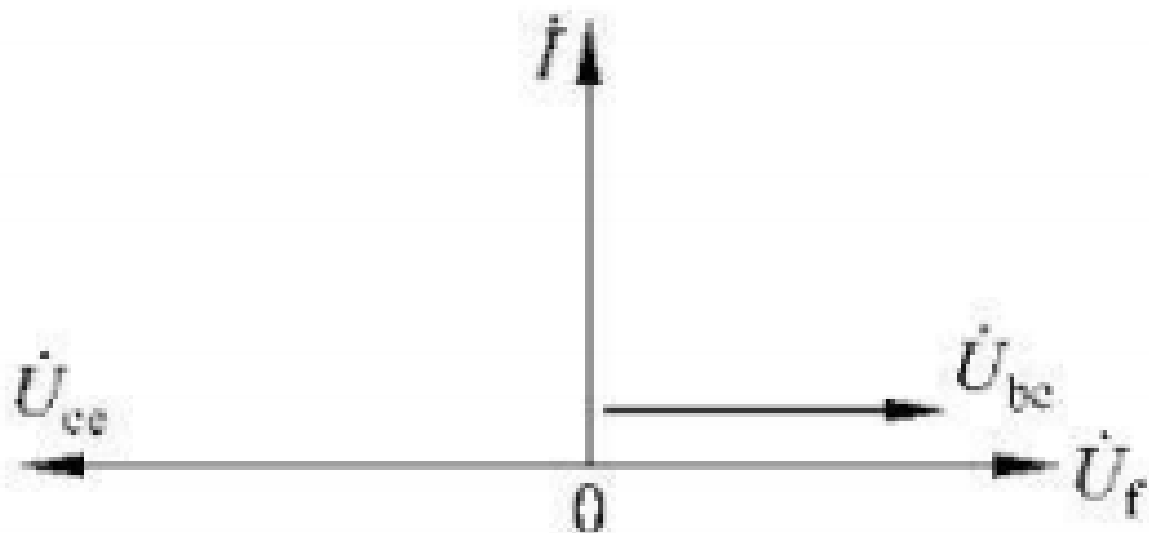


图 4-10 电容三点式振荡器矢量图

假定在晶体管的 b 、 e 间有一输入信号 \dot{U}_{be} ，当振荡频率等于 LC 回路谐振频率时， \dot{U}_{ce} 与 \dot{U}_{be} 反相，电流 \dot{i} 滞后于 \dot{U}_{ce} 90度。 C_2 上的反馈电压滞后电流 \dot{i} 90度，故 \dot{U}_f 与 \dot{U}_{be} 同相，满足相位平衡条件。

二、电容三点式振荡器

电容反馈三点线路，也叫“考毕兹”振荡电路。

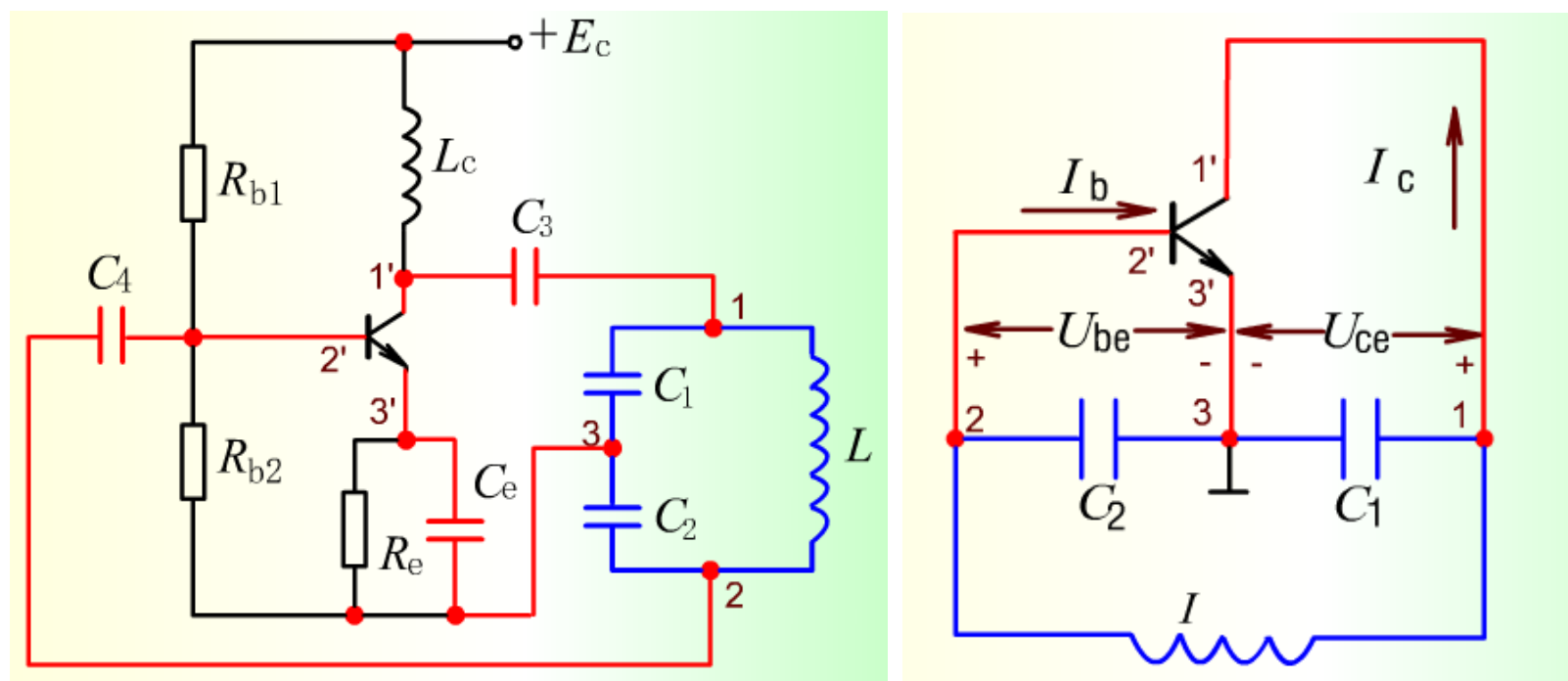


图4-9 电容三点式振荡器



1. 电路相位平衡条件的判断

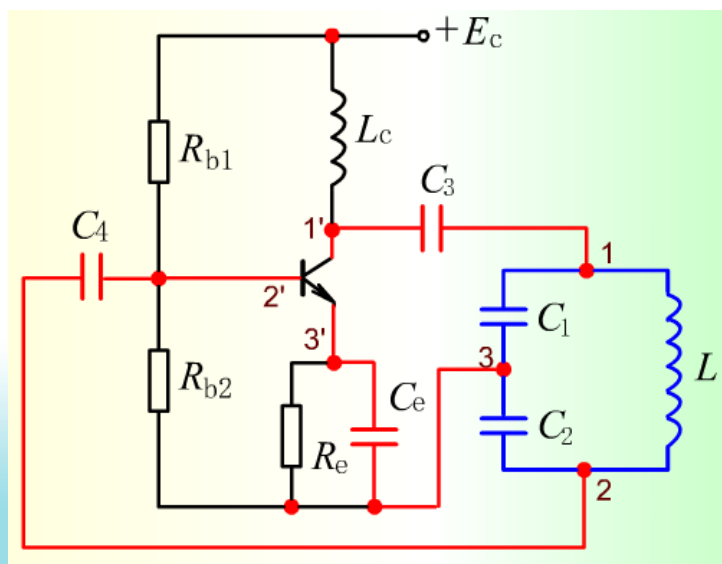
满足“射同集（基）反”

- 1) 与发射极相连的两电抗 X_{ce} 和 X_{be} 性质相同;
- 2) X_{cb} 和 X_{ce} 、 X_{be} 性质相反。

注：对于场效应管振荡器，将发射极改为源极即可。

2. 反馈信号从哪取得？

从C两端取得，送回放大器输入端。由于它是利用电容将谐振回路的一部分电压反馈到基极上，而且也是将LC谐振回路的三个端点分别与晶体管三个电极相连，所以这种电路又叫电容反馈三点式振荡器。



3. 起振条件

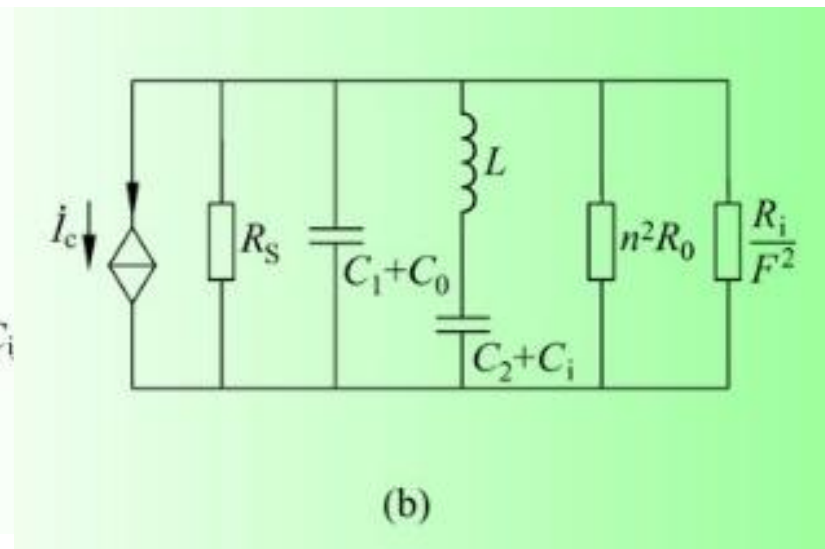
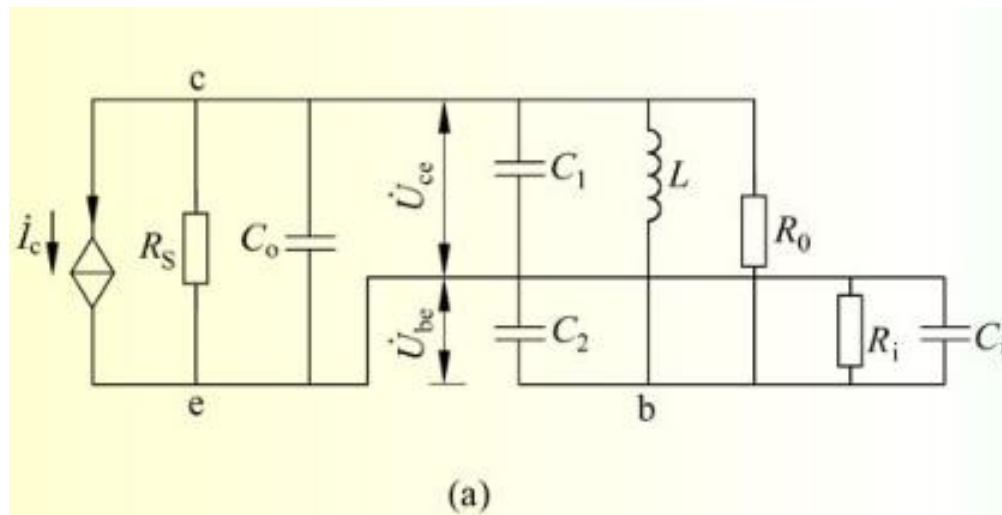


图4-11 图4-9的等效电路



3. 起振条件

求出放大倍数 K 和反馈系数 F ，看它们的乘积是否大于1。图中：

R_s — 晶体管输出电阻； C_o — 晶体管输出电容；

R_i — 晶体管输入电阻； C_i — 晶体管输入电容；

R_0 — 回路谐振电阻

$$F = \frac{U_{be}}{U_{ce}} \approx \frac{C_1 + C_o}{C_2 + C_i}, (C_1 + C_o = C'_1), (C_2 + C_i = C'_2)$$

$$F \approx \frac{C'_1}{C'_2}$$



现把各元件都折合到c-e端。

$$K = \frac{\beta R_{\Sigma}}{R_i} \quad \frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{n^2 R_0} + \frac{F^2}{R_i} \quad (n = \frac{C_2'}{C_1' + C_2'})$$

$$K \cdot F = \frac{\beta R_{\Sigma}}{R_i} \cdot F > 1 \quad \beta > \frac{R_i}{F} \left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{n^2 R_0} \right) + F$$

如果 $n^2 R_0 \gg R_S$ 则回路损耗可以忽略，得

$$\beta > \frac{R_i}{R_S} \cdot \frac{1}{F} + F$$

通常考虑易起振又不致使振荡波形的非线性失真严重，都选得较小，大约在0.01~0.5之间，

$$\beta > \frac{R_i}{R_S} \cdot \frac{1}{F} \quad \beta > \frac{R_i}{R_0} \cdot \frac{C_2'}{C_1'}$$



4. 振荡器的振荡频率 f_0

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2}}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

其中

$$C = \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2}$$

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{L \frac{(C_1 + C_o)(C_2 + C_i)}{C_1 + C_2 + C_o + C_i}}}$$





5.优缺点

1) 优点

①振荡波形好；

②电路的频率稳定度较高，适当加大回路的电容量，就可以减小不稳定因素对振荡频率的影响；

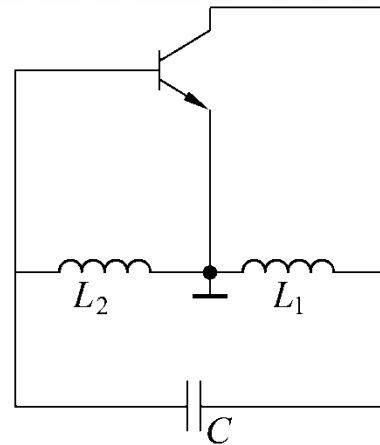
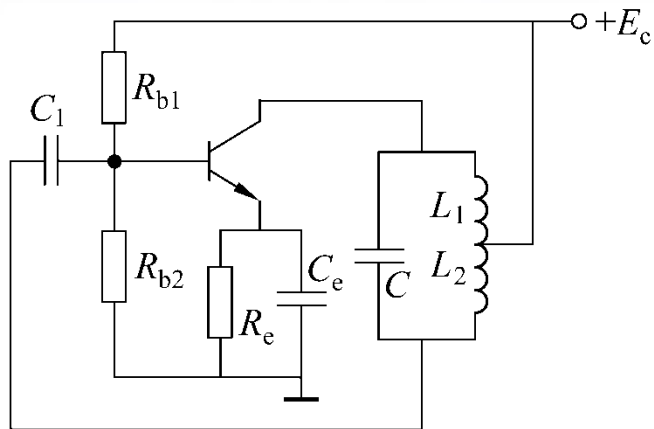
③工作频率可以做得较高，可直接利用晶体管的输出、输入电容作为回路的振荡电容。工作频率可做到几十MHz到几百MHz的甚高频波段范围。

2) 缺点

调 C_1 或 C_2 来改变振荡频率时，反馈系数也将改变。但只要在L两端并上一个可变电容器，并令 C_1 与 C_2 为固定电容，则在调整频率时，基本上不会影响反馈系数。

4.3.2 电感三点式振荡器（哈特莱电路）

1. 电路



2. 反馈系数

$$F = \frac{L_2}{L_1}$$

3. 振荡频率

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

其中

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



4.优缺点

1) 优点

- ① L_1 、 L_2 之间有互感，反馈较强，容易起振；
- ② 振荡频率调节方便，只要调整电容C的大小即可；
- ③ C的改变基本上不影响电路的反馈系数。

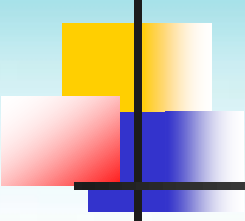
2) 缺点

- ① 振荡波形不好，因为反馈电压是在电感上获得，而电感对高次谐波呈高阻抗，因此对高次谐波的反馈较强，使波形失真大；
- ② 振荡频率不能做得太高，这是因为当频率太高，极间电容影响加大，可能使支路电抗性质改变，从而不能满足相位平衡条件。



4.4 改进型电容三点式电路

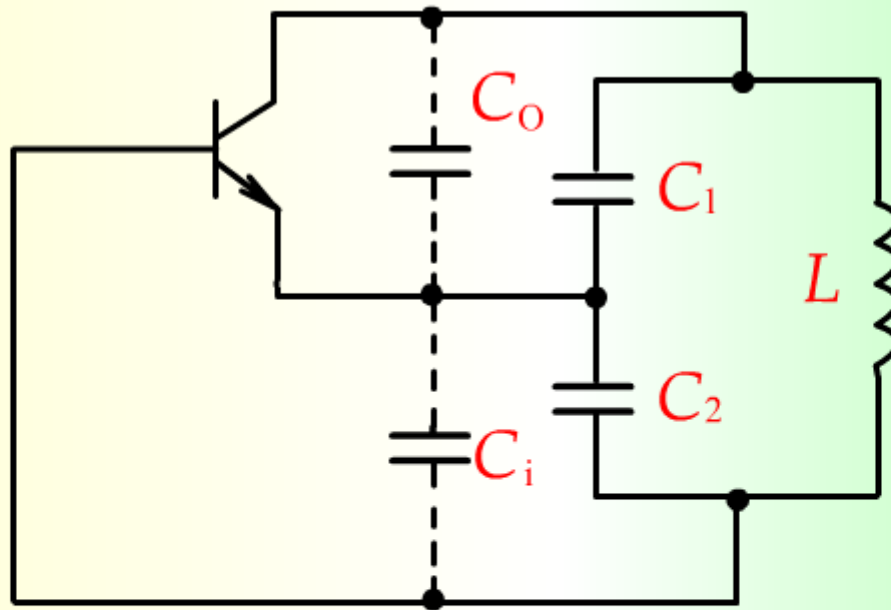
- 一、串联改进型电容反馈三点线路
(克拉泼电路)
- 二、并联改进型电容反馈三点线路
(西勒电路)



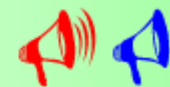
LC 振荡器的振荡频率不仅与谐振回路的 LC 元件的值有关，而且还与晶体管的输入电容以及输出电容有关。当工作环境改变或更换管子时，振荡频率及其稳定性就要受到影响。

例如，对于电容三点式电路，晶体管的电容 C_o 、 C_i 分别同回路电容 C_1 、 C_2 并联，振荡频率可以近似写成：

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L \frac{(C_1 + C_o)(C_2 + C_i)}{C_1 + C_2 + C_o + C_i}}} \quad (4-22)$$



YHZ/CY



$$(C_2 + C_i = C'_2),$$

$$(C_1 + C_o = C'_1),$$

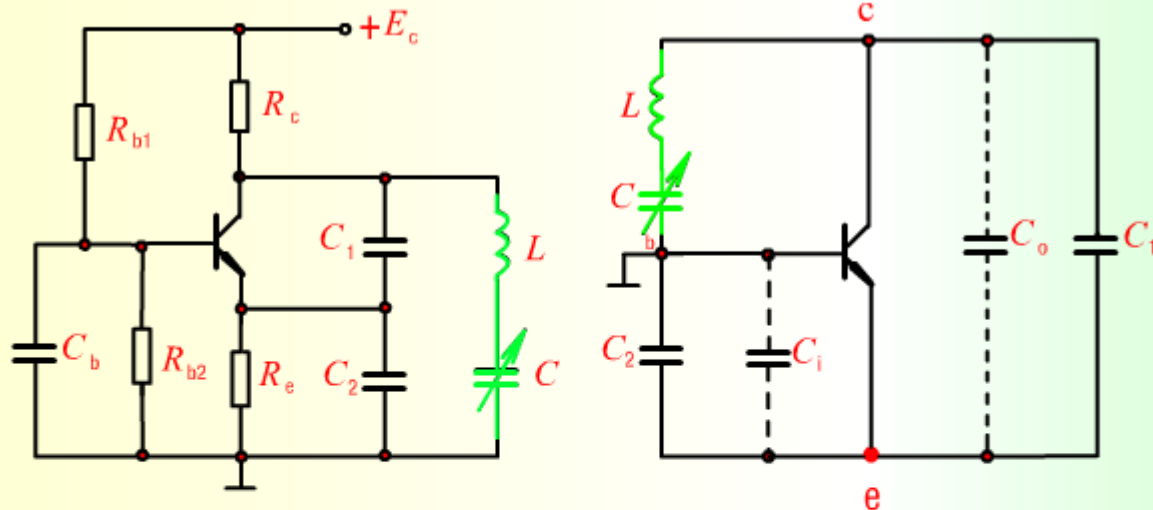


如何减小 C_o 、 C_i 的影响，以提高频率稳定度呢？

表面看来，加大回路电容 C_1 与 C_2 的电容量，可以减弱由于 C_o 、 C_i 的变化对振荡频率的影响。但是这只适用于频率不太高， C_1 和 C_2 较大的情况。

当频率较高时，过分地增加 C_1 和 C_2 ，必然减小 L 的值（维持振荡频率不变），这就导致回路的 Q 值下降，振荡幅度下降，甚至会使振荡器停振。这就有待于改进。

一、串联改进型电容反馈三点线路 (克拉泼电路)



(a) 原理图

(b) 等效电路

特点：把电容反馈三点线路集电极-基极支路的电感改为L-C串联回路代替，所以叫改进型电容反馈三点线路

图4-16 串联改进型电容反馈三点电路——(克拉泼)



1. 电路特点

把基本型的电容反馈三点线路**集电极-基极支路的电感**改用 **L - C 串联回路代替**，这正是它的名称的由来——串联改进型电容反馈三点线路，又叫“克拉泼”电路。



2. 振荡频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}} \quad \frac{1}{C_\Sigma} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1 + C_o} + \frac{1}{C_2 + C_i}$$

选 $C_1 \gg C$, $C_2 \gg C$ 时, $C_\Sigma \approx C$

振荡频率可近似写成

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4-23)$$

这就使 C_o 和 C_i 几乎与 ω_0 值无关, 它们的变动对振荡频率的稳定性就没有什么影响了, 提高了频率稳定度。

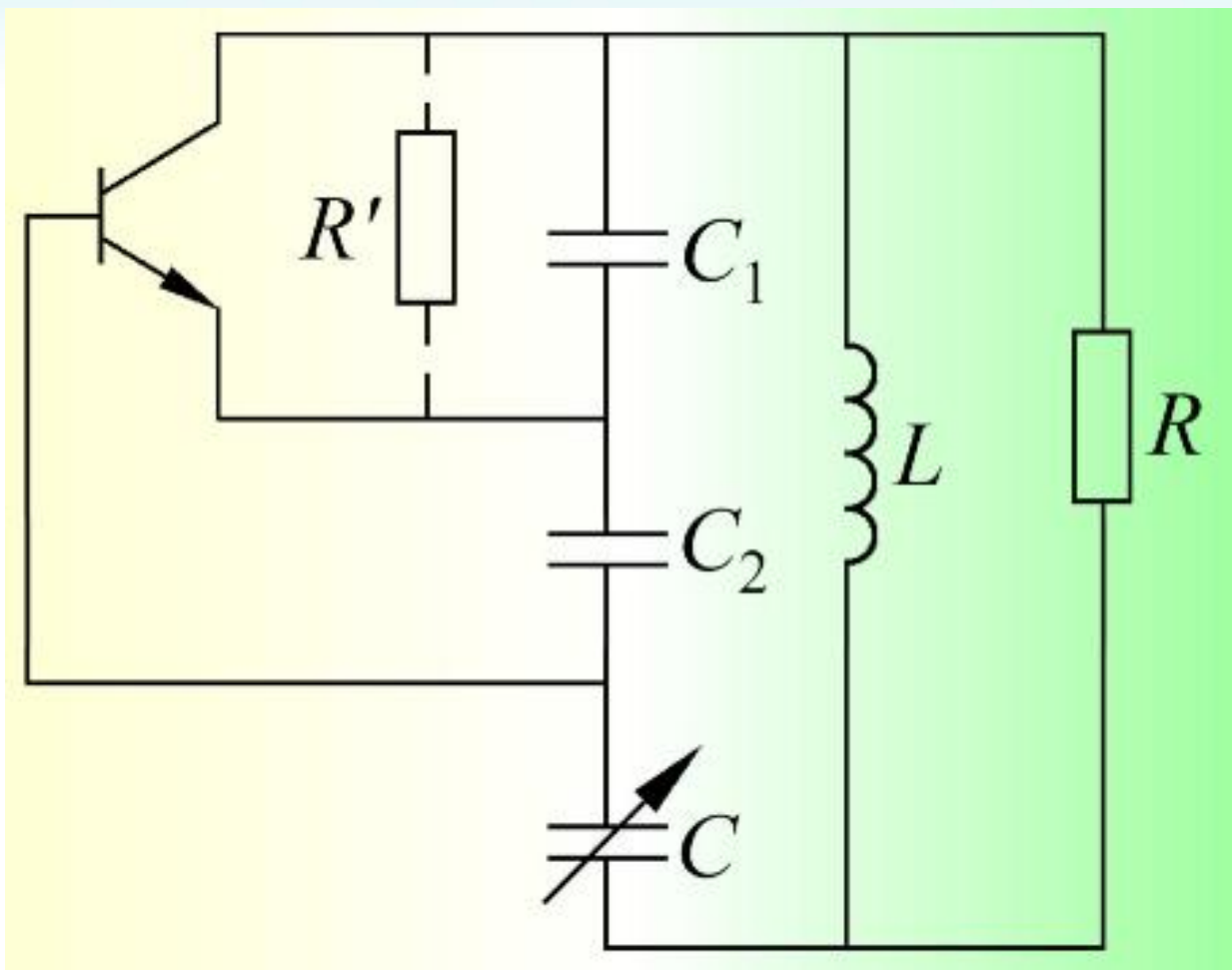
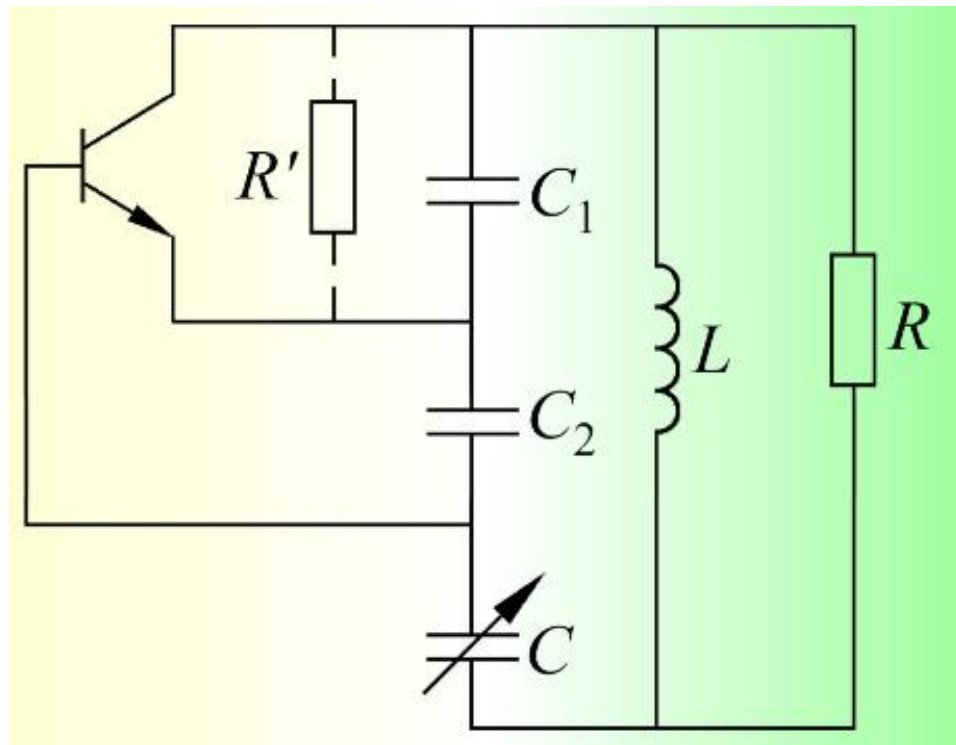


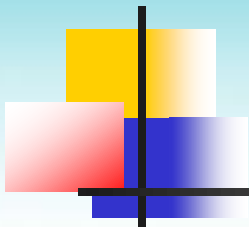
图4-16 谐振电阻 R 折合到晶体管输出端

3. 电容 C_1 、 C_2 的选取

$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 成立的条件是 C_1 和 C_2 都要选得比较大。但是不是 C_1 、 C_2 愈大愈好呢？

为了说明这个问题，我们从分析回路谐振电阻入手。





- 折合到晶体管端的电阻

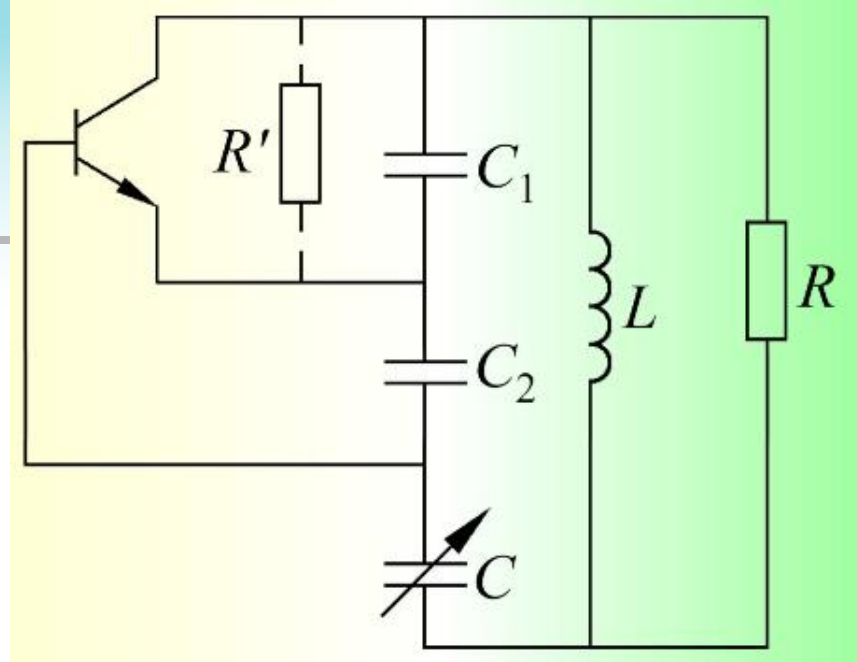
$$R' = n^2 R$$

式中

n —— 接入系数，也叫分压比。

$$n = \frac{C_2 C}{C_2 + C} \bigg/ \left(C_1 + \frac{C_2 C}{C_2 + C} \right), \quad R' = \left[\frac{C_2 C}{C_2 + C} \bigg/ \left(C_1 + \frac{C_2 C}{C_2 + C} \right) \right]^2 R$$

因为 $C_2 \gg C$ 则 $R' = n^2 R \approx \left(\frac{C}{C_1 + C} \right)^2 R$





谐振电阻可表示为 $R = Q\omega_0 L$

又因 $C_1 \gg C$

$$n = \frac{C}{C_1} \approx \frac{1}{\omega_0^2 LC_1}$$

$$R' = n^2 R \approx \frac{\omega_0 L Q}{\omega_0^4 L^2 C_1^2} = \frac{1}{\omega_0^3} \cdot \frac{Q}{LC_1^2}$$

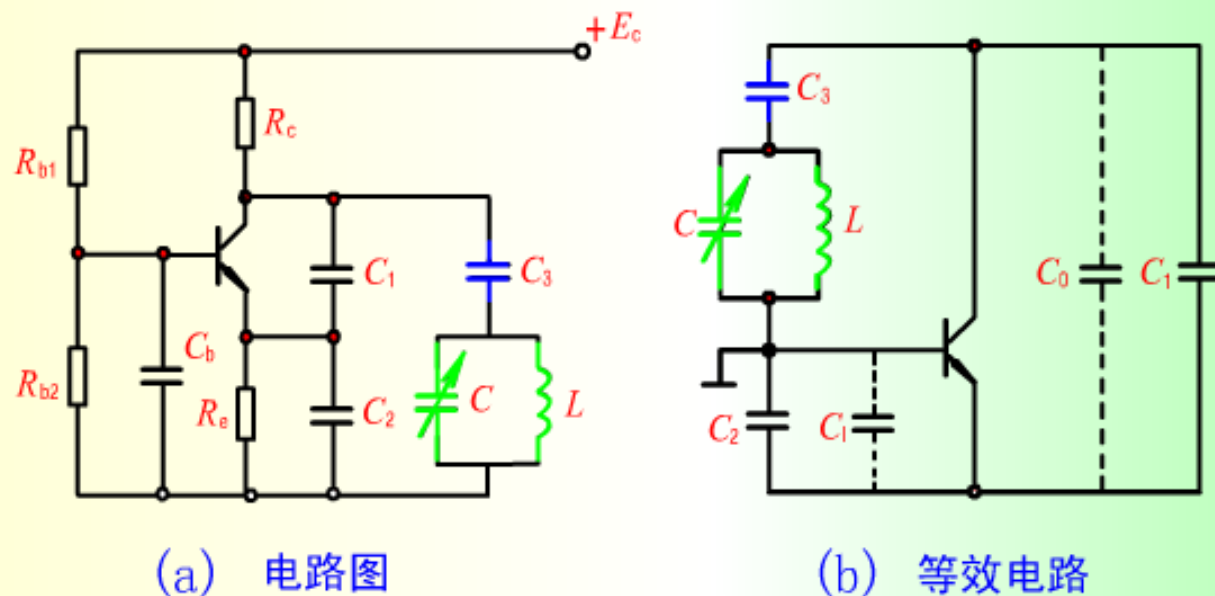


4. 优缺点

克拉泼振荡器虽然可以提高频率稳定度，但存在以下缺点：

- 1) C_1 、 C_2 如过大，则振荡幅度就太低。
- 2) 当减小 C 来提高 f_0 时，振荡幅度显著下降；当 C 减到一定程度时，可能停振。
- 3) 用作频率可调的振荡器时，振荡幅度随频率增加而下降，在波段范围内幅度不平稳，因此，频率覆盖系数（在频率可调的振荡器中，高端频率和低端频率之比称为频率覆盖系数）不大，约为 1.2~1.3 。

二、并联改进型电容反馈三点线路 (西勒电路)



特点：把基本型的电容反馈三点线路集电极-基极支路改成LC并联回路再与 C_3 串联，所以叫并联改进型。也叫西勒电路。

并联改进型电容反馈三点线路—西勒电路



1. 电路特点

除了采用两个容量较大的 C_1 、 C_2 外，主要是把基本型的电容反馈线路集电极-基极支路改用 LC 并联回路再与 C_3 串联，所以叫并联改进型，也叫“西勒”电路。



2. 谐振频率

$$\omega_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$$

$$C_\Sigma = C + \frac{1}{\frac{1}{C_1 + C_0} + \frac{1}{C_2 + C_i} + \frac{1}{C_3}}$$

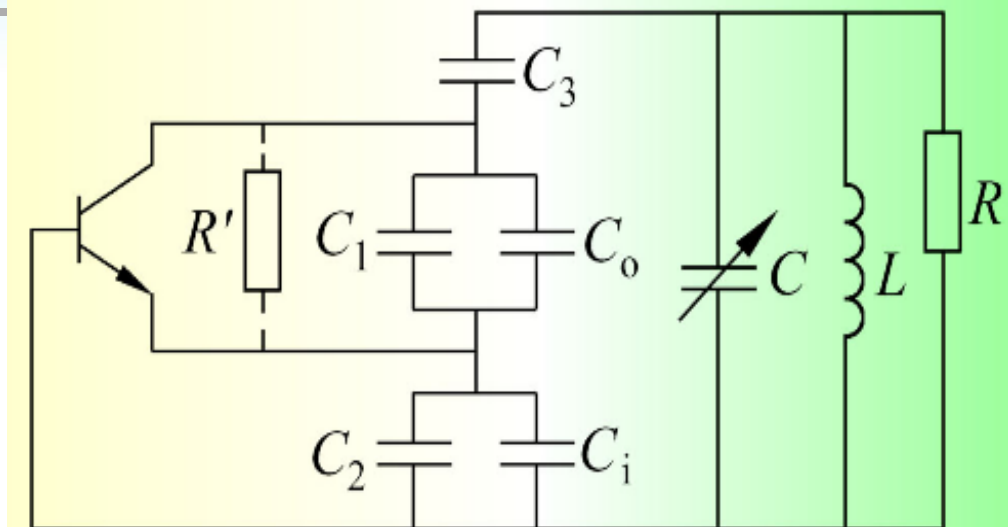
选择 $C_1 \gg C_3$ $C_2 \gg C_3$, 则 $C_\Sigma = C + C_3$, 消除了 C_i , C_0 , 对 ω_0 的影响

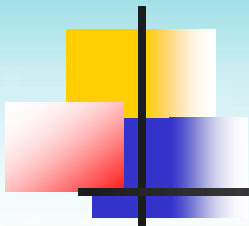
3. 折合到晶体管输出端的谐振电阻

$$R' = n^2 R$$

求出分压比 n

$$\begin{aligned} n &= \frac{C_3 C_2'}{C_3 + C_2'} \bigg/ \left(C_1' + \frac{C_3 C_2'}{C_3 + C_2'} \right) \\ &= 1 \bigg/ \left[1 + \frac{C_1 (C_3 + C_2')}{C_3 C_2'} \right] \\ &= 1 \bigg/ \left[1 + \frac{(C_1 + C_o)(C_3 + C_2 + C_i)}{C_3 (C_2 + C_i)} \right] \end{aligned}$$





由上式可知， n 和 C 无关，当调节 C 来改变振荡频率时， n 不变。

把 R 折合到 c-e 端， $R' = n^2 R = n^2 Q \omega_0 L$

改变 C 时， n 、 L 、 Q 都是常数，则 R' 仅随 ω_0 一次方增长，易于起振，振荡幅度增加，使在波段范围内幅度比较平稳，频率覆盖系数较大，可达1.6~1.8。

另外，西勒电路频率定性好，振荡频率可以较高。因此，在短波、超短波通信机，电视接收机等高频设备中得到广泛的应用。





4.5 振荡器的频率稳定问题

振荡器的频率稳定是一个十分重要的问题。例如：

通信系统的频率不稳，就会漏失信号而联系不上；

测量仪器的频率不稳，就会引起较大的测量误差；

在载波电话中，载波频率不稳，将会引起话音失真。



一、振荡器的频率稳定度

振荡器的频率稳定度指标是用频率稳定度来衡量的。频率稳定度有两种表示方法：

1. **绝对频率稳定度**。它是指在**一定条件**下实际振荡频率与标准频率的偏差 $\Delta f = f - f_0$
2. **相对频率稳定度**。它是指在一定条件下，绝对频率稳定度与标准频率之间的比值 $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0}$

常用的是相对频率稳定度，简称频率稳定度。

注：“**一定条件**”可以指**一定的时间范围或一定的温度或电压变化范围**。

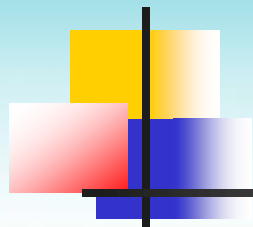


例如，在**一定时间范围内的**频率稳定度可以分为以下几种情况：

短期稳定度——一小时内的相对频率稳定度。一般用来评价测量仪器和通信设备中主振器的频率稳定指标；

中期稳定度——一天内的相对频率稳定度；

长期稳定度——数月或一年内的相对频率稳定度。



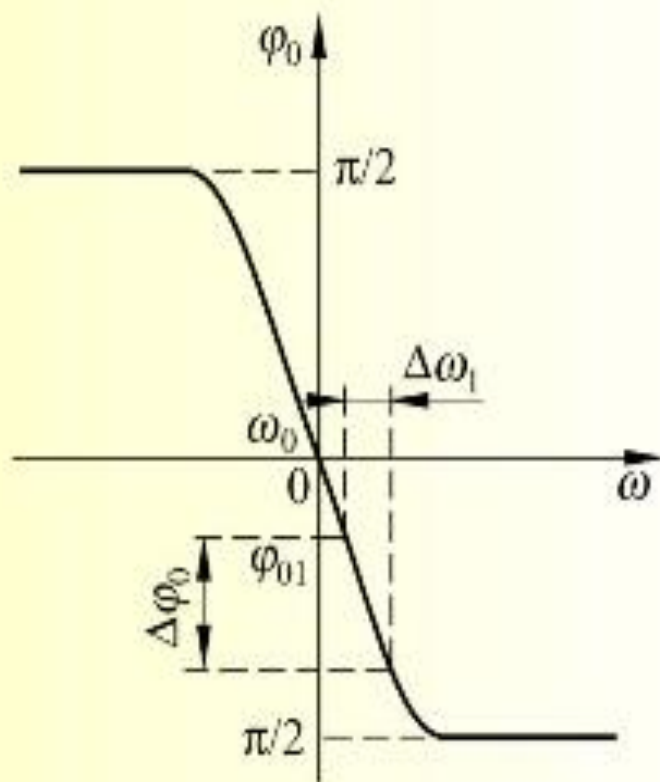
频率稳定度用10的负几次方表示，次方绝对值越大，稳定度越高。

中波广播电台发射机的中期稳定度是 $2 \times 10^{-5}/\text{日}$ ；

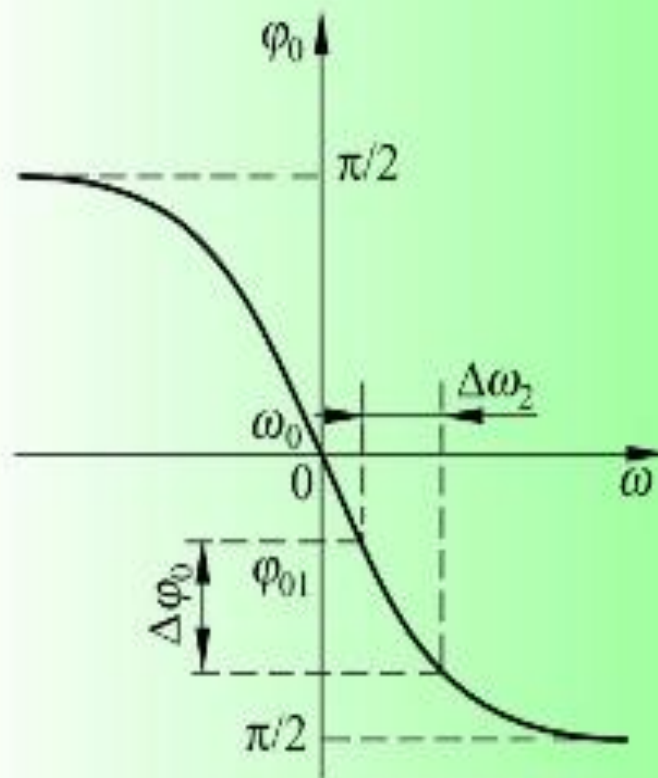
电视发射台是 $5 \times 10^{-7}/\text{日}$ ；

一般LC振荡器是 $10^{-3} \sim 10^{-4}/\text{日}$ ；

克拉泼和西勒振荡器是 $10^{-4} \sim 10^{-5}/\text{日}$ 。



(a) Q 高, 频率变化 $\Delta\omega_1$ 小



(b) Q 低, 频率变化 $\Delta\omega_2$ 大

图4-19 相频特性曲线



二、稳频措施

- 减小温度的影响
- 稳定电源电压
- 减少负载的影响
- 晶体管与回路之间的连接采用松耦合。
- 提高回路的品质因数
- 使振荡频率接近于回路的谐振频率
- 屏蔽、远离热源。