



第四章 正弦波振荡器

4.1 概述

4.2 反馈振荡原理

4.3 LC振荡器

4.4 晶体振荡器

4.5 压控振荡器



4.1 概述

正弦波振荡器：能自动将直流电能转换成（具有一定频率和振幅的）正弦交流电能的电路。它与放大器的区别在于这种转换不需外部信号的控制。振荡器输出的信号频率、波形、幅度完全由电路自身的参数决定。

应用：作载波、本振信号；信号源及无线电测量仪表。

产生方式：反馈式振荡器和负阻式振荡器

分类：频率：低频、高频振荡器

输出波形：正弦振荡器(简谐)和非正弦振荡器(多谐)

要求：频率稳定度高



4.2 反馈振荡原理

4.2.1 基本组成

4.2.2 振荡的建立与振荡条件

4.2.3 反馈振荡电路判断

4.2.4 振荡器的频率稳定度

4.2.1 基本组成

反馈式振荡器：

利用正反馈产生自激振荡

反馈系数： $F = \frac{U_f}{U_0} = |F| e^{j\varphi_F}$

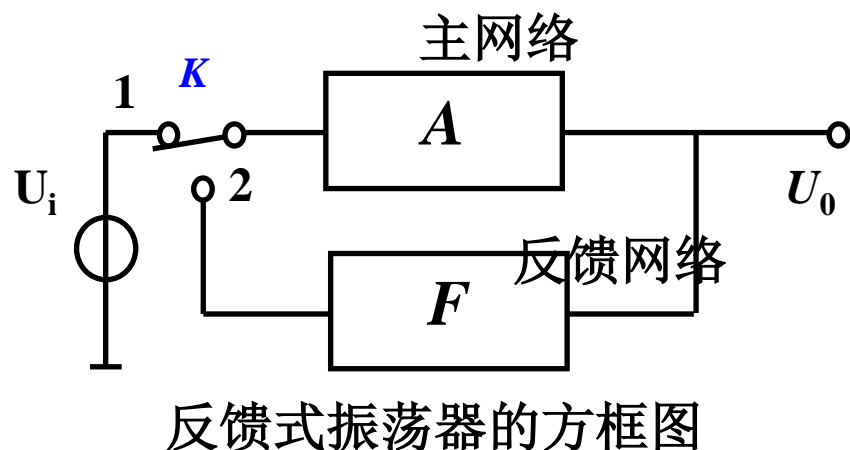
开环增益： $A = \frac{U_0}{U_i} = |A| e^{j\varphi_A}$

开关K接在1端， $U_o = AU_i$ 。这时将开关迅速地转换到接于2端，**去掉外部输入**，此时 **$U_f = U_o F = U_i AF$**

若 **$AF=1$** ，则 **$U_f = U_i$** ，没有输入也能维持输出，构成了振荡电路。

环路增益： **$T = AF$**

$T > 1$ ：增幅振荡； **$T < 1$** ：减幅振荡



4.2.2 振荡的建立与振荡条件

一、振荡的建立与稳定

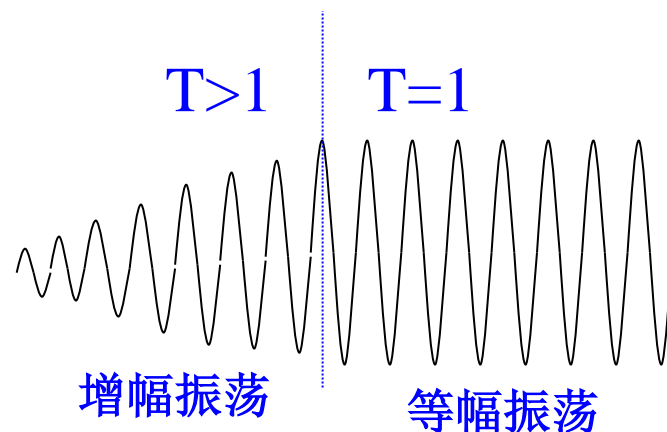
1、基本原理

原始激励：电源接通瞬间，相当于接入脉冲跳变信号，此外，电路中还有噪声，它们包含有丰富地频率成分，但是幅度非常微弱。

对于某一频率 ω_0 的信号若满足： $T(\omega_0) > 1$ ，则每循环一次，幅度就增大一次，产生增幅振荡，如图所示。

振荡幅度增大，稳幅电路使 $T(\omega_0)$ 降低，最终使 $T(\omega_0) = 1$ ，振荡器进入稳幅振荡状态。

ω_0 称为振荡频率，或叫作振荡器的工作频率



起振和稳幅过程

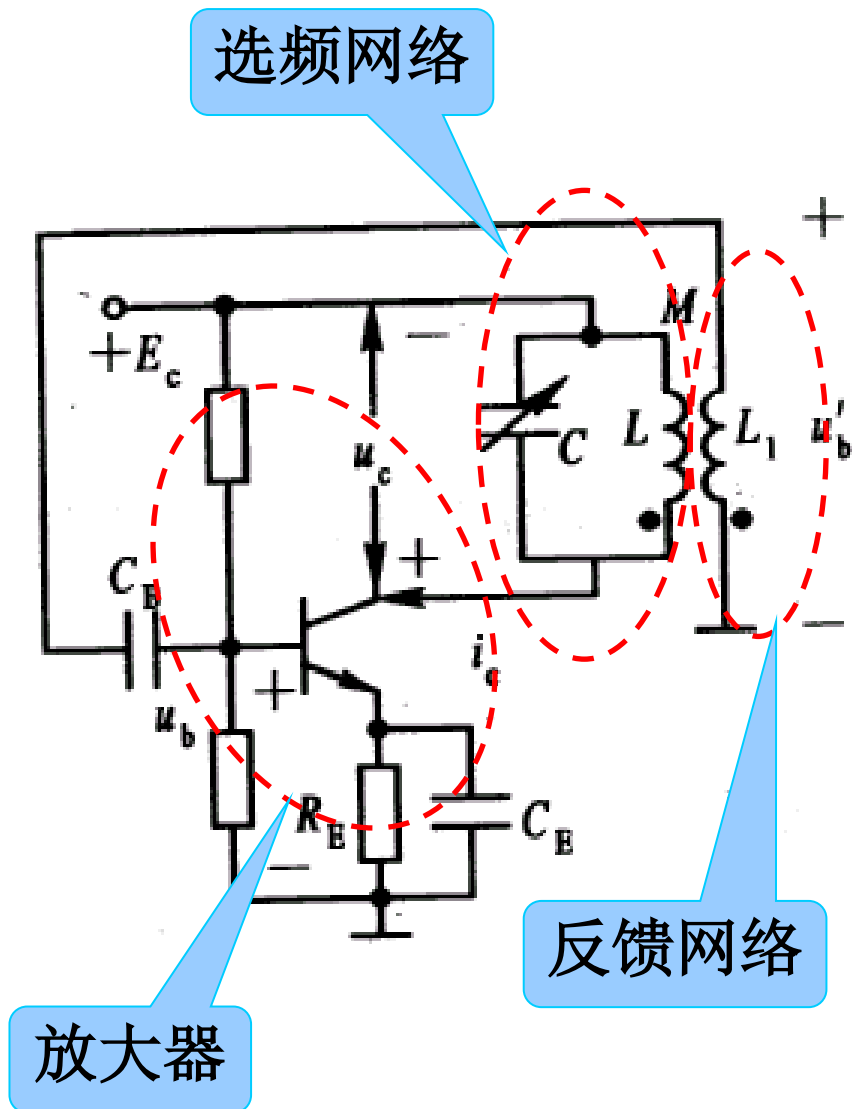
2、电路组成：

放大器——完成能量转换

选频网络——完成频率选择及滤波

反馈网络——完成正反馈

稳幅电路——决定振荡的稳态振幅



二、振荡条件

1、起振条件:

$$\dot{T}(\omega_0) > 1$$

振幅起振条件: $|T| = |A| \cdot |F| > 1$

相位起振条件: $\varphi_T(\omega_0) = \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad (n=0,1,2,3\dots)$
即正反馈条件

2、平衡条件:

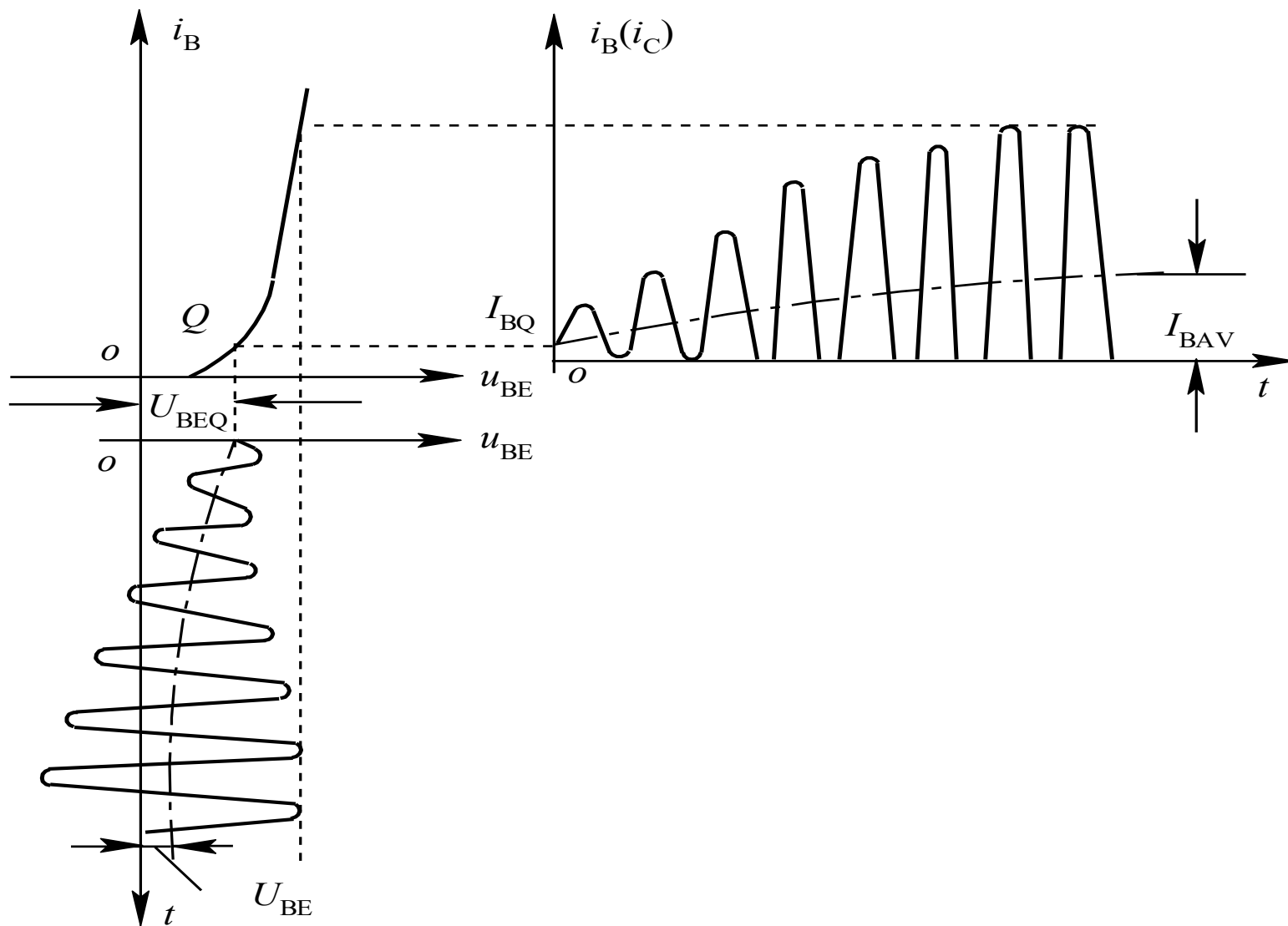
$$\dot{T}(\omega_0) = 1$$

振幅平衡条件: $|T| = |A| \cdot |F| = 1$

相位平衡条件: $\varphi_T(\omega_0) = \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad (n=0,1,2,3\dots)$

相位平衡条件的含义----建立正反馈

满足振荡平衡条件时，经过稳幅过程实现等幅输出。

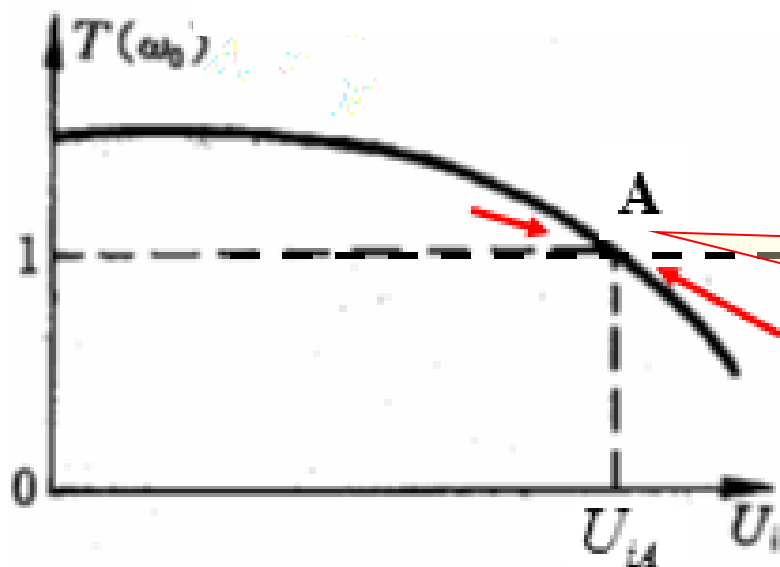


振荡电压的建立

3、振荡稳定条件

1) 振幅稳定条件

指当外界因素造成振荡幅度变化后，振荡器能够自动恢复原来振荡幅度所需满足的条件。



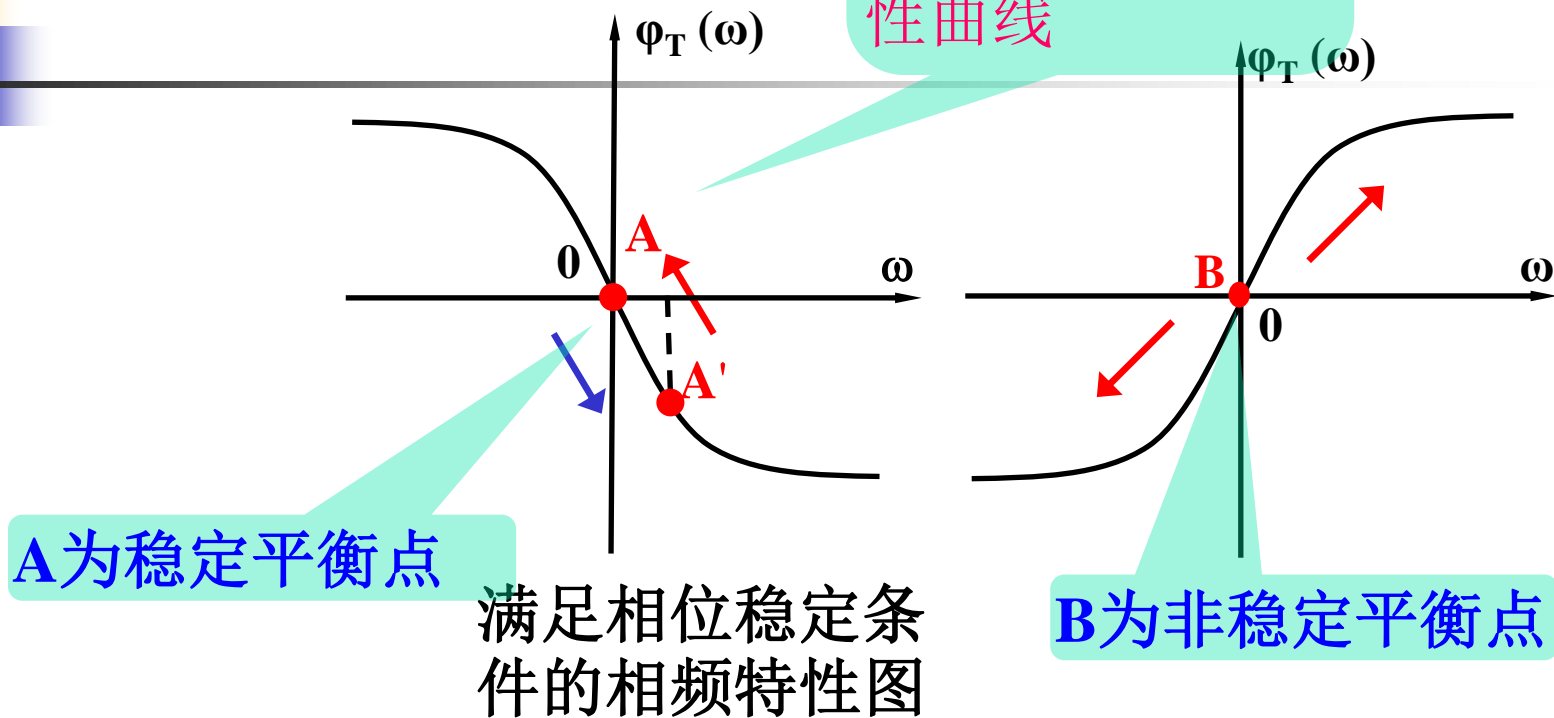
满足起振和平衡条件的环路增益特性

A为稳定平衡点，当某种扰动使电路离开A点 ($T \neq 1$) 时，电路会自动回到A点；

振幅稳定条件：
$$\left. \frac{\partial T}{\partial U_i} \right|_{U_{iA}} < 0$$

(2) 相位稳定条件

LC并联谐振回路
(放大器的负载)
的阻抗的相频特
性曲线



负载回路相频特性： ω 增大， φ_T 减小。即

相位稳定条件：
$$\left. \frac{\partial \varphi_T(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_A} < 0$$



4.2.3 反馈振荡电路判断

需考虑的因素：

(1).放大器 工作在放大状态

(2).满足起振条件：共射、共基、共集

(3).满足正反馈

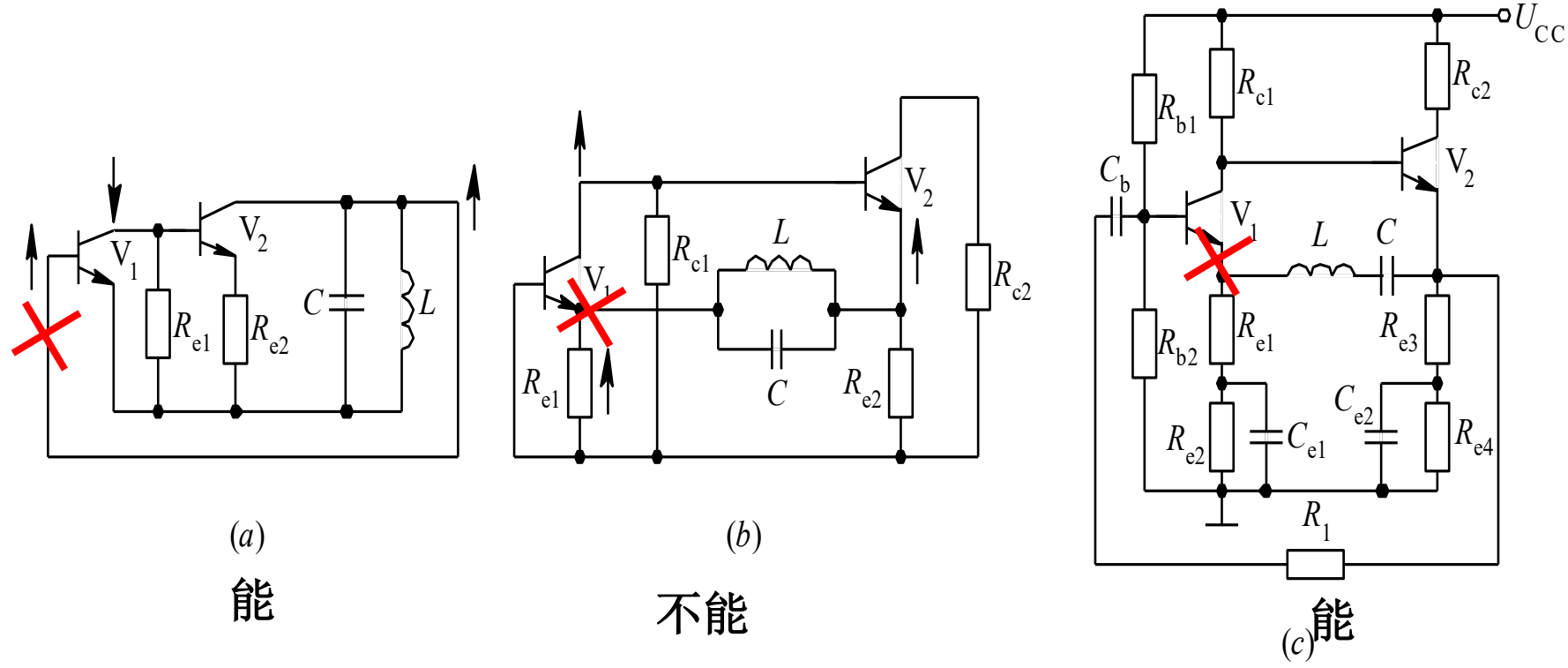
(4).选频网络应具有负斜率的相频特性

LC并联谐振回路的阻抗相频特性、

串联谐振回路的导纳相频特性

例4.1 判断图例4.1所示各反馈振荡电路能否正常工作。

其中(a)、(b)是交流等效电路,(c)是实用电路。



图例4.1

4.2.4 振荡器的频率稳定度

1、定义：指当外界条件变化时，振荡器的实际工作频率与标称频率间的偏差程度。

设实际工作频率为 f_1 ，标称频率为 f_0

绝对频率偏差： $\Delta f = f_1 - f_0$

相对频率偏差： $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_1 - f_0}{f_0}$

频率稳定度：在一定时间间隔内振荡频率的相对变化量，即

$$\delta = \left| \frac{f - f_0}{f_0} \right|_{(\text{时间间隔})}$$

- 常用的是相对稳定度。
- 用 10^{-n} 表示， n 的值越大，稳定度越高。

2、提高LC振荡器频率稳定度的措施

(1) 减小外界因素的变化

采用稳压或振荡器单独供电的方法来稳定电源电压；

采用恒温或温度补偿的方法来抵消温度变化的影响；

采用屏蔽、密封、抽真空措施减小磁场、湿度、压力变化等的影响；

加入减振装置减小机械振动的影响；

采用隔离电路减小负载变化的影响等。



(2) 提高电路抗外界因素变化的能力

选取合理的电路形式, 提高振荡回路的标准性。

已知: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, 则 $\Delta\omega_0$ 与谐振回路元件参数 L 、 C 的关系为:

$$\Delta\omega_0 = \frac{\partial\omega_0}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial\omega_0}{\partial C} \Delta C = -\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \omega_0$$

选用参数高度稳定的 L 、 C 元件, 如用石英晶体替代谐振回路的 L , 或者采用温度系数小或温度系数相反的电抗元件组成回路。

减弱三极管与回路之间的耦合, 实现元器件合理排队。即将三极管以部分接入方式接入回路, 也可以减小极间电容对谐振回路的影响。



4.3 LC正弦波振荡器

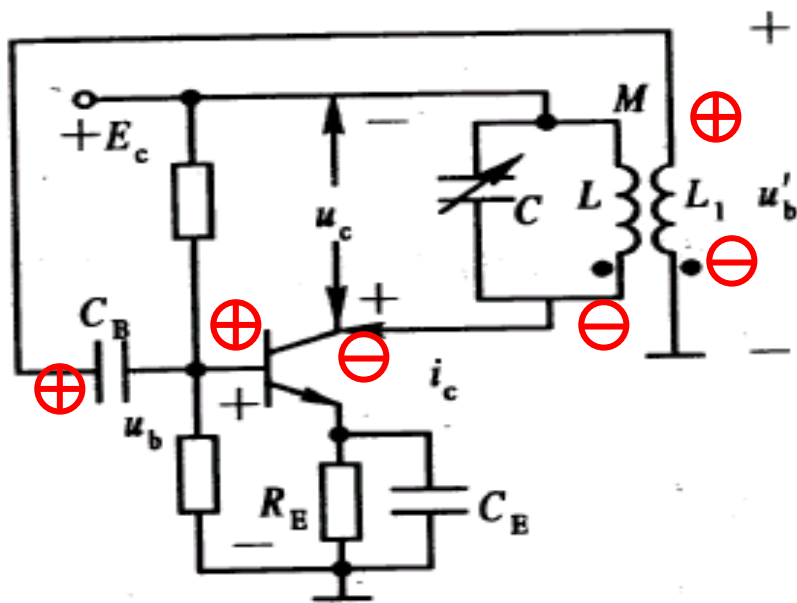
4.3.1 互感耦合振荡器

4.3.2 三点式振荡器 (自耦变压器耦合 / 电容耦合)

4.3.3 改进型电容三点式振荡器

4.3.1 互感耦合振荡器（调集型共射态）

一. 基本电路（反馈网络由变压器来充当）



振荡频率近似等于
 LC 回路的谐振频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L+M)C}}$$

互感耦合反馈式振荡电路

二、三个条件

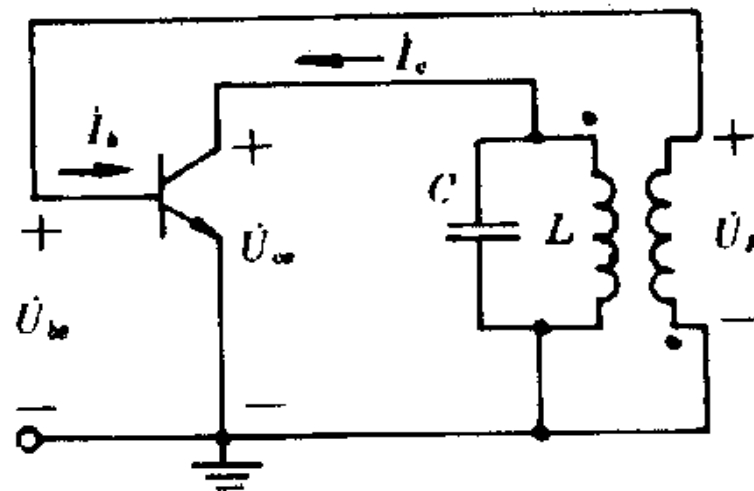
(1). 起振条件 ($AF > 1$)

(2). 平衡条件

相位平衡条件

(由互感线圈的同名端保证正反馈)

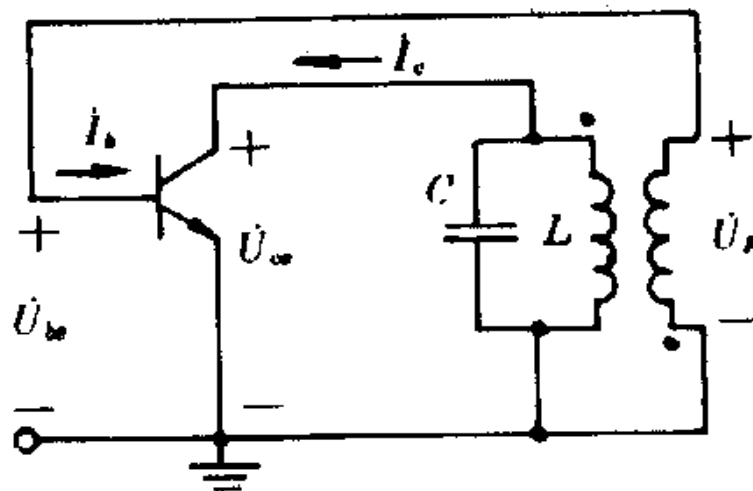
(3). 稳定条件



(b)

相位平衡条件

- ◆ 由互感线圈的同名端保证正反馈。
- ◆ 判断晶体管工作组态及线圈同名端的方法：
 - (1) LC调谐回路所接端——输出端
 - (2) 反馈线圈所接端——输入端
 - (3) 剩下的端口——公共组态
 - (4) 共e——输出、输入反相；
共c、共b——输出、输入同相



(b)

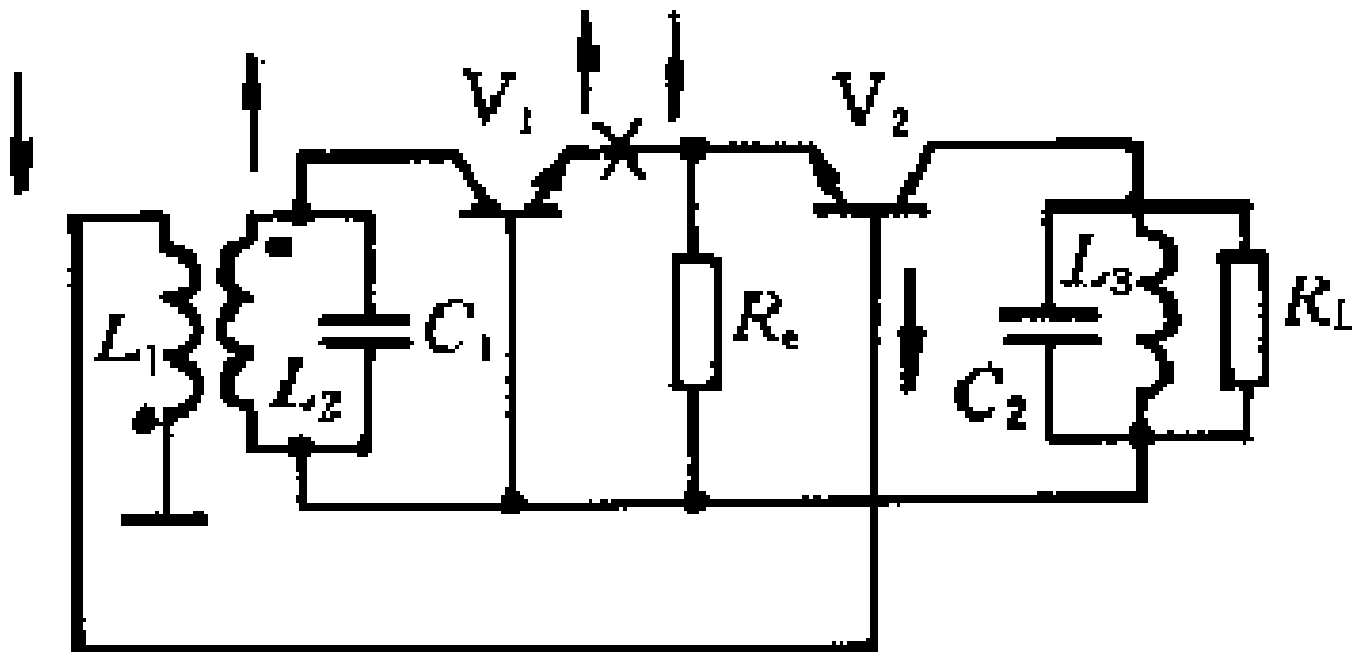


三、互感耦合振荡器优缺点

- 优点：易起振，输出电压较大，结构简单，调频方便，且调频时输出电压变化不大，常用于收音机中本振。
- 缺点：由于互感耦合元件分布电容的存在，限制了振荡频率的提高，只适用于较低频段（中、短波），且频率稳定性差。高次谐波感抗大，输出波形不理想。

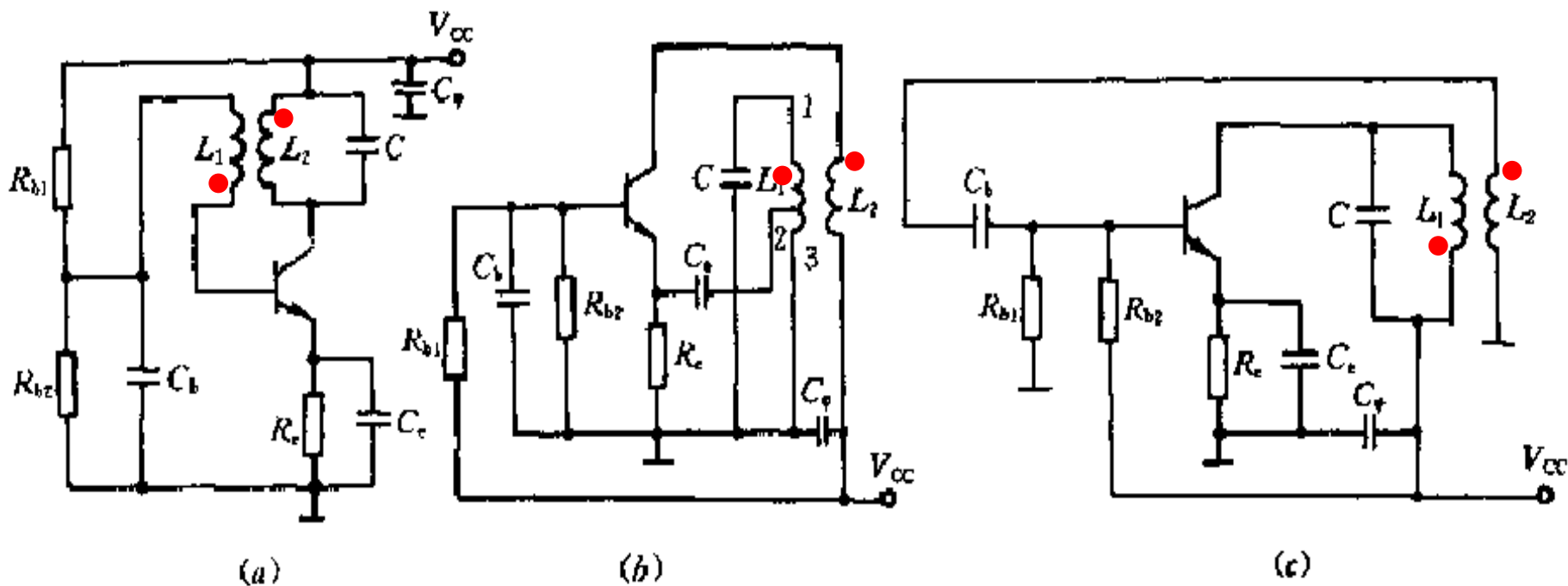
例1:

判断图示两级互感耦合振荡电路能否正常工作。



例2：习题4.1（P102）：

画出其高频等效电路，并注明电感线圈的同名端。

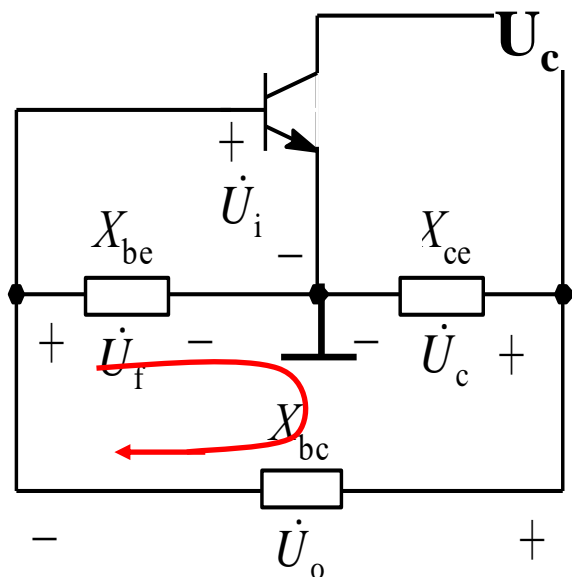




4.3.2 三点式振荡器(几百MHz)

- 一、构成三点式振荡器的基本原则
- 二、电容三点式
- 三、电感三点式
- 四、克拉泼电路
- 五、西勒电路

一、三点式振荡器构成原则



(1). 回路要谐振:

$$X_{be} + X_{bc} + X_{ce} = 0$$

(2). 要构成正反馈:

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

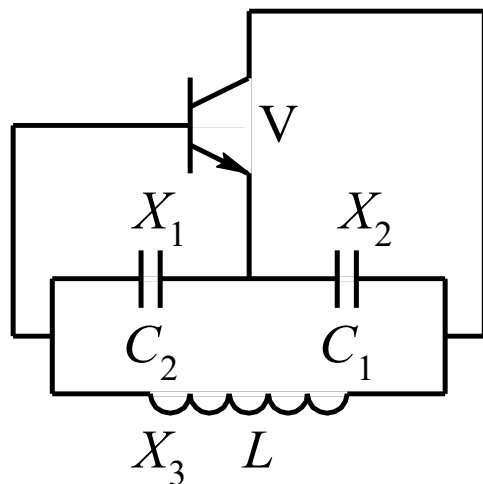
$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_c} = \frac{jX_{be}\dot{I}}{-jX_{ce}\dot{I}} = -\frac{X_{be}}{X_{ce}}$$

故需: X_{be} 与 X_{ce} 同性质,

X_{bc} 与 X_{be} 、 X_{ce} 异性质。

——“射同余异”法则

按照三点式振荡器的组成法则，有两种基本电路：



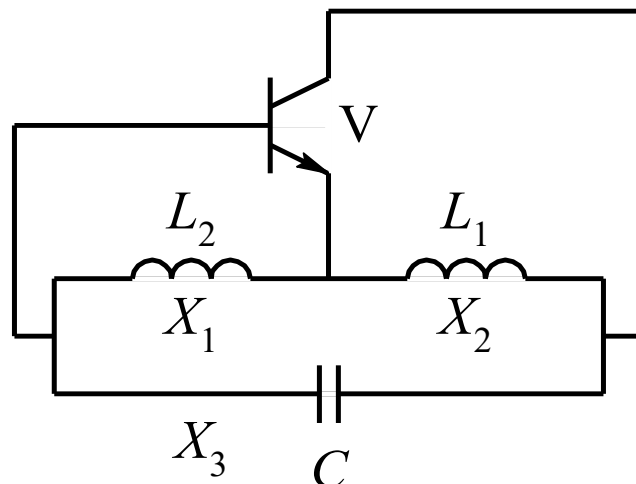
(a)

电容反馈振荡器

电容三点式

考毕兹Colpitts振荡器

它的反馈电压取自 C_1 和 C_2 组成的分压器；



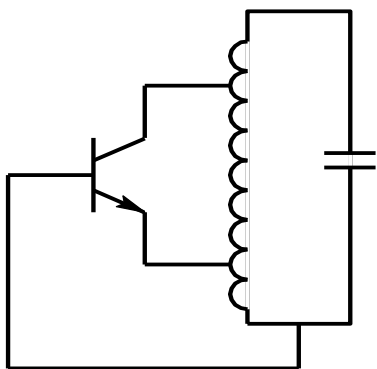
(b)

电感反馈振荡器

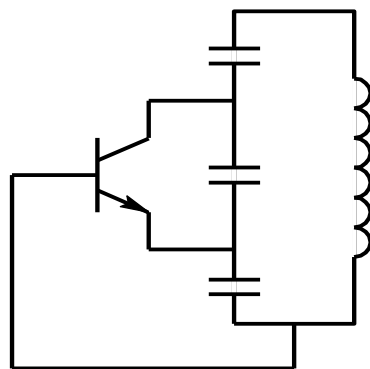
电感三点式

哈特莱Hartley振荡器

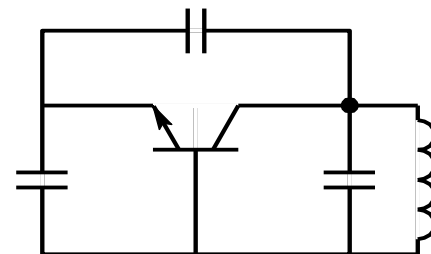
它的反馈电压取自 L_1 和 L_2 组成的分压器；



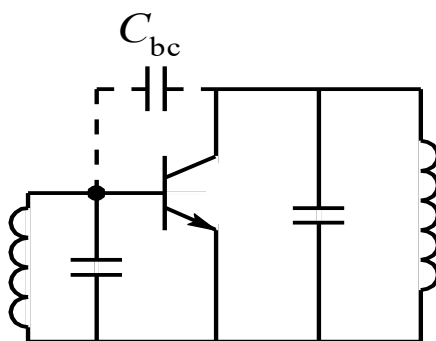
(a)



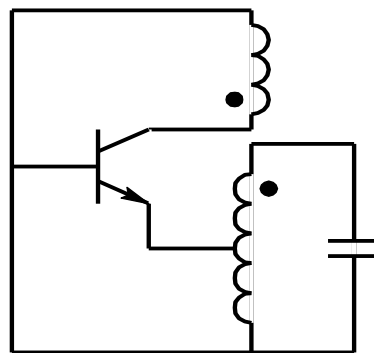
(b)



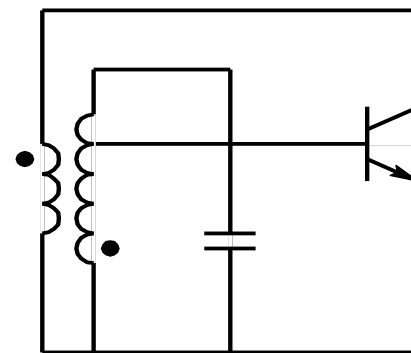
(c)



(d)



(e)



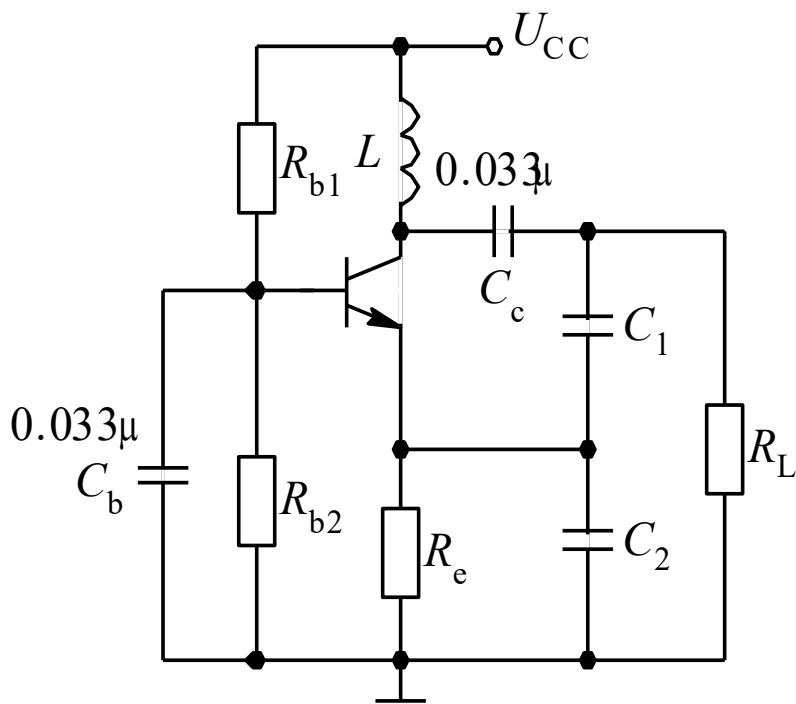
(f)

几种常见振荡器的高频电路

二. 电容三点式电路

(考毕兹 (Coplitts) 电路)

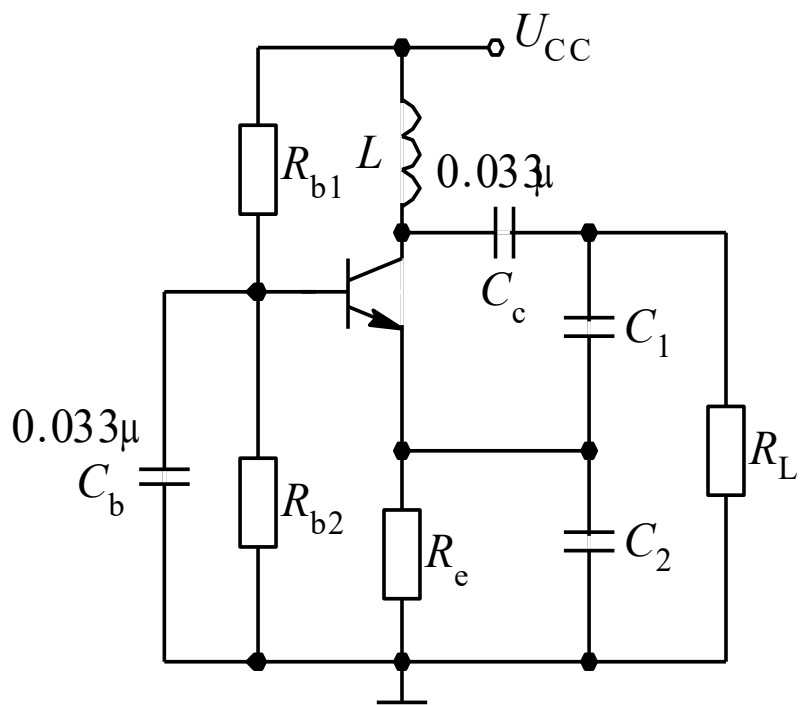
1. 线路特点



(a)

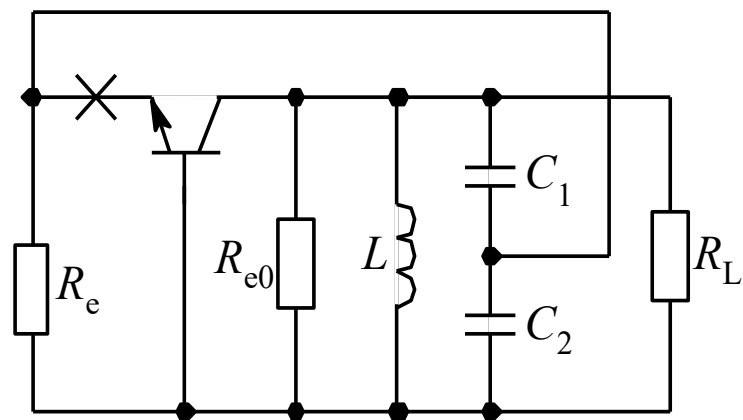
R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_e 为直流偏置电阻；振荡产生后作为自偏压电阻，稳幅作用。

C_c 耦合电容、 C_b 隔直流电容



(a)

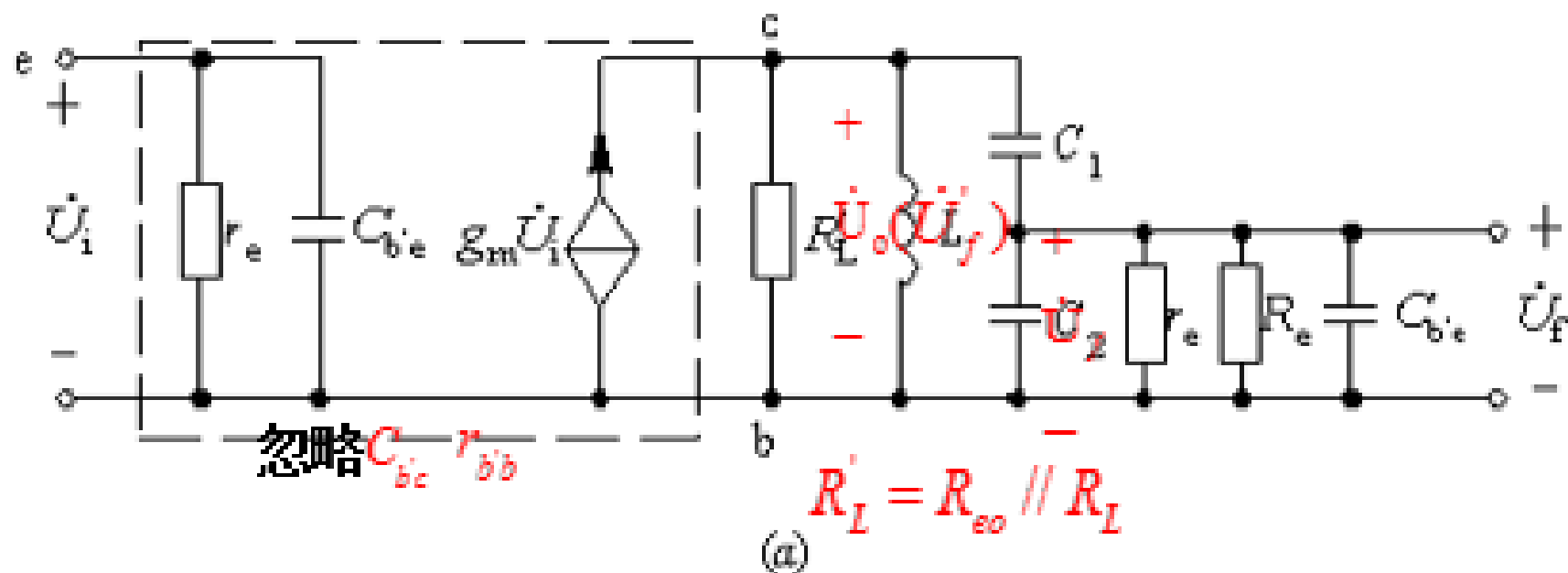
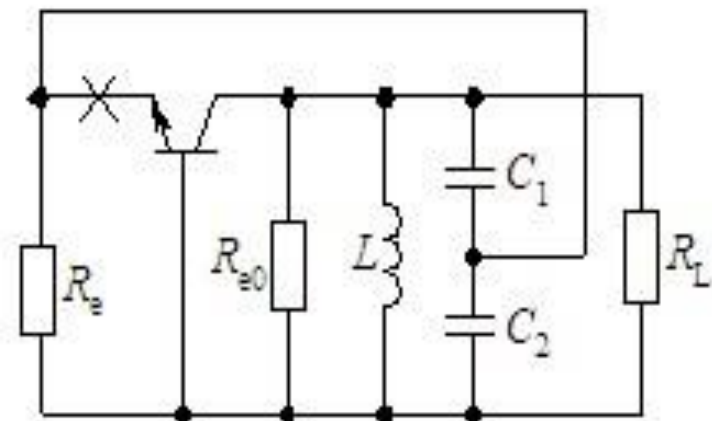
交流等效电路:



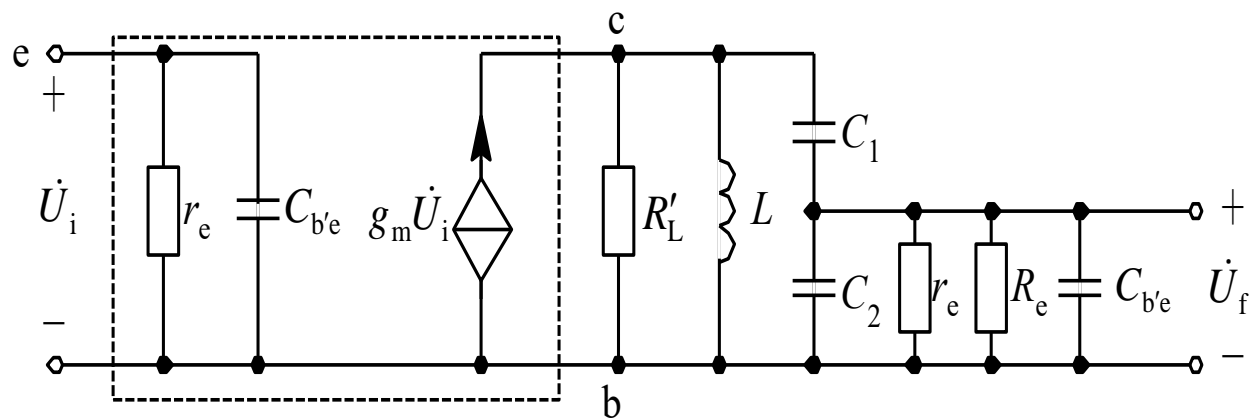
(三点式电路满足相位条件)

(b)

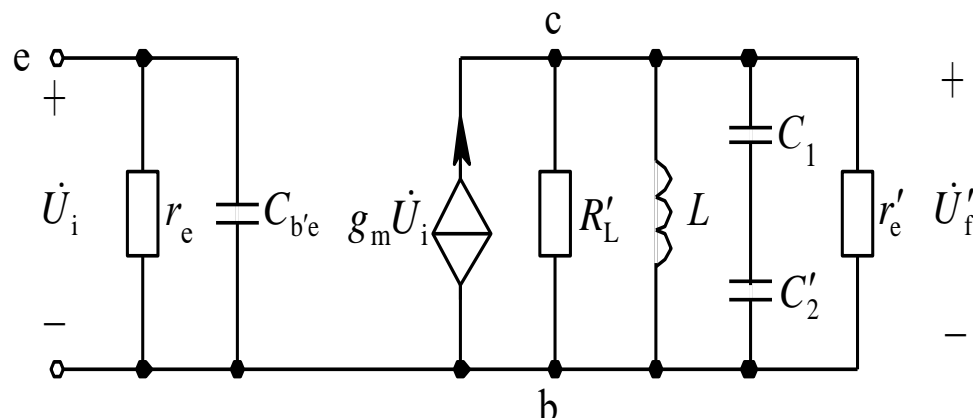
2. 起振条件 ($AF=T>1$)



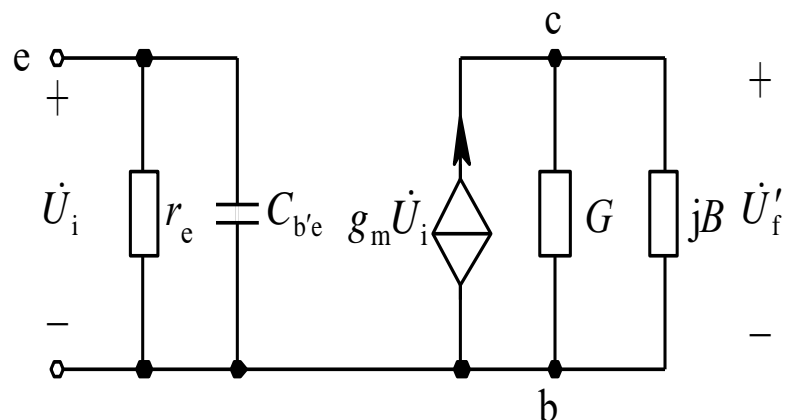
反馈系数:
$$F = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_f'} = n = \frac{C_1}{C_1 + (C_2 + C_{be})} \approx \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$



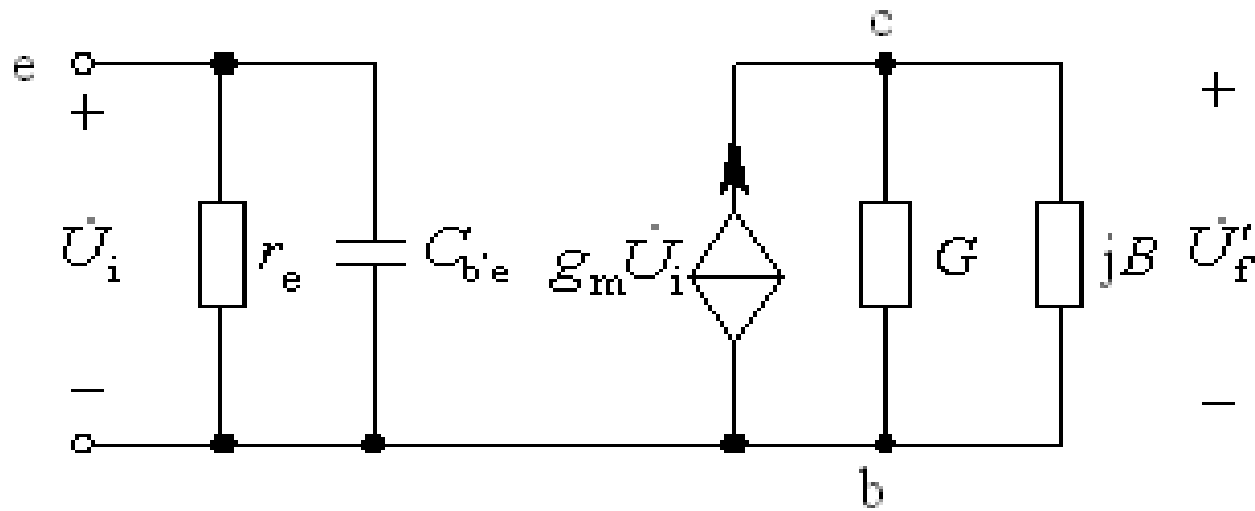
(a)



$$r'_e = \frac{1}{n^2} (r_e \parallel R_e) \approx \frac{1}{n^2} r_e$$



$$G = g'_L + g'_e = \frac{1}{R'_L} + \frac{1}{r'_e} \quad B = \omega C_2 - \frac{1}{\omega L}$$



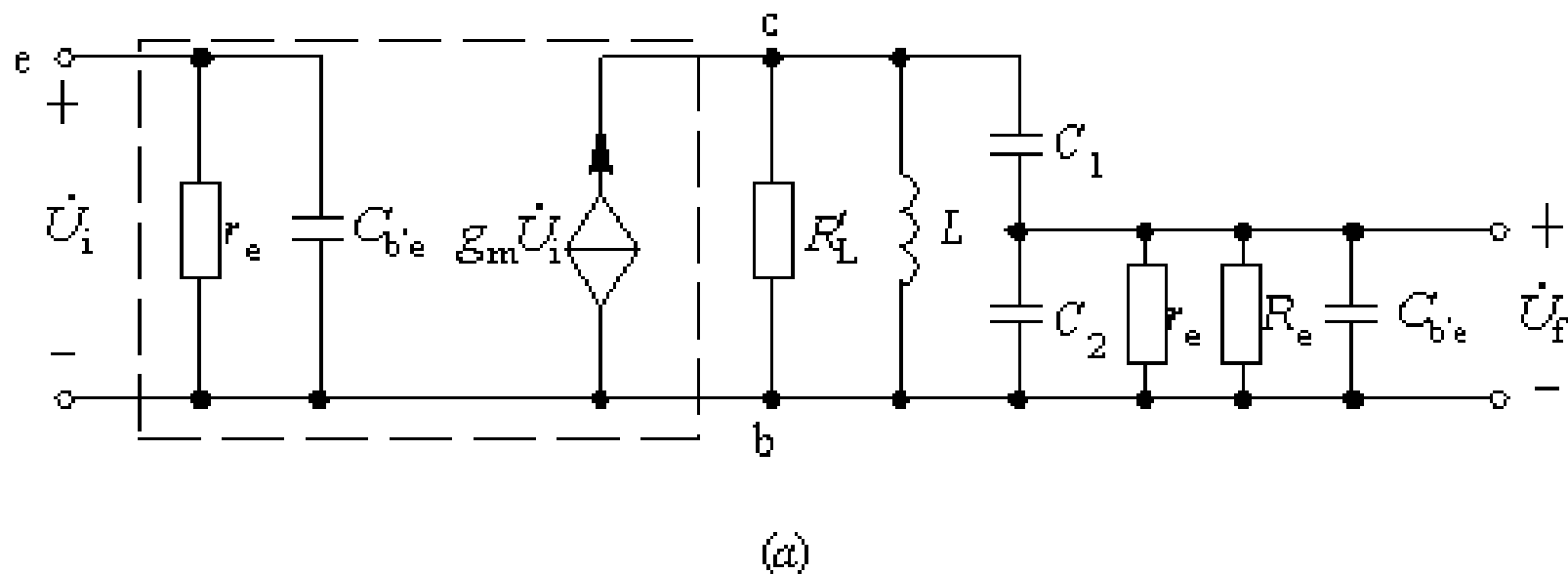
$$\dot{T} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_i} = \frac{n\dot{U}_f'}{\dot{U}_i} = \frac{ng_m}{G + jB} = \frac{ng_m}{g_L' + g_e' + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})}$$

$$T > 1 \Rightarrow \frac{ng_m}{g_L' + g_e'} > 1$$

$$\text{即 } g_m > \frac{1}{n}(g_L' + g_e') = \frac{1}{n}\left(\frac{1}{R_L // R_{e0}} + n^2 \frac{1}{r_e}\right)$$

电路要易起振，
需： g_m 较大、
 $r_{b'e}$ 较大的晶体管，
 R_L 、 R_{e0} 也要大，
 n 要合理选择

3. 振荡频率



L 、 C_1 、 C_2 构成谐振回路，决定振荡频率：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}} \quad C_\Sigma = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1}$$

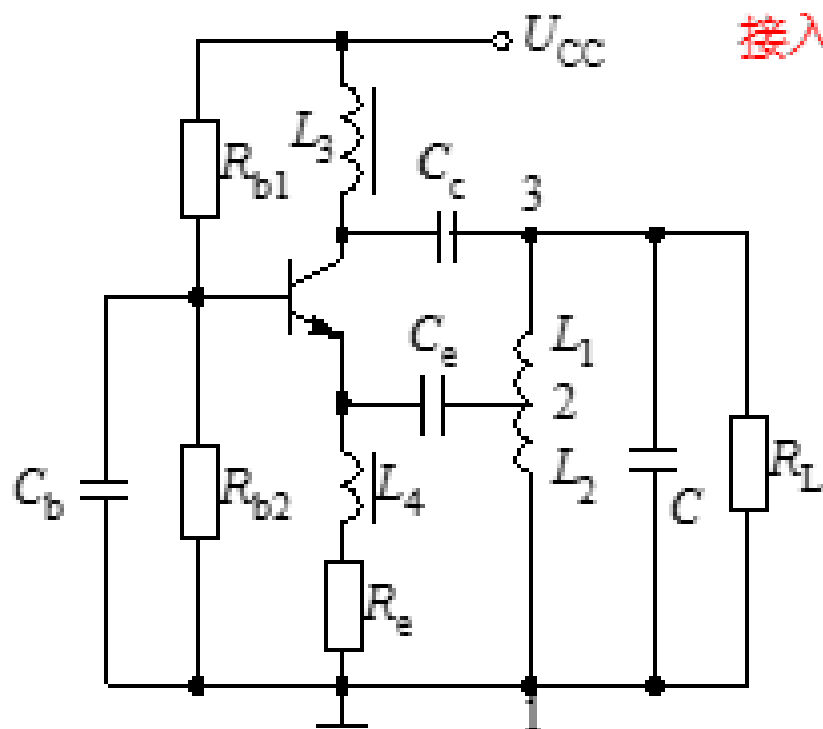


4. 电容三点式振荡器的特点

- 优点：电容作为输出、反馈元件，它对谐波呈现的阻抗小，能较好地滤除高次谐波。因此**输出波形好**，工作频率较高。
- 缺点：频率不易调整，改变回路电容会同时改变反馈系数，甚至可能造成回路停振。 C_o 、 C_i 影响频率稳定度。

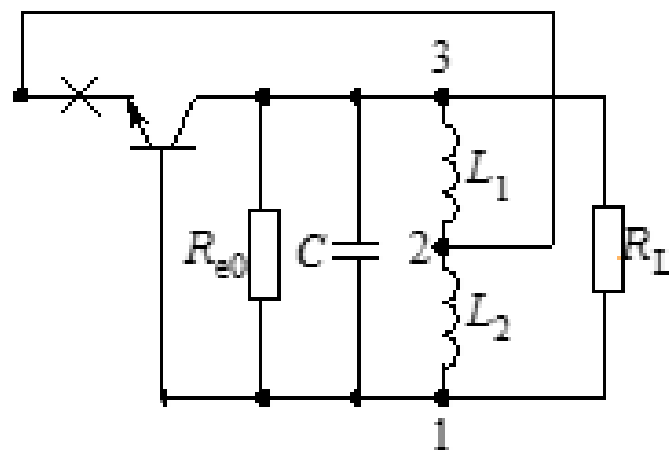
三、电感三点式振荡电路

——哈特莱(Hartley)振荡器



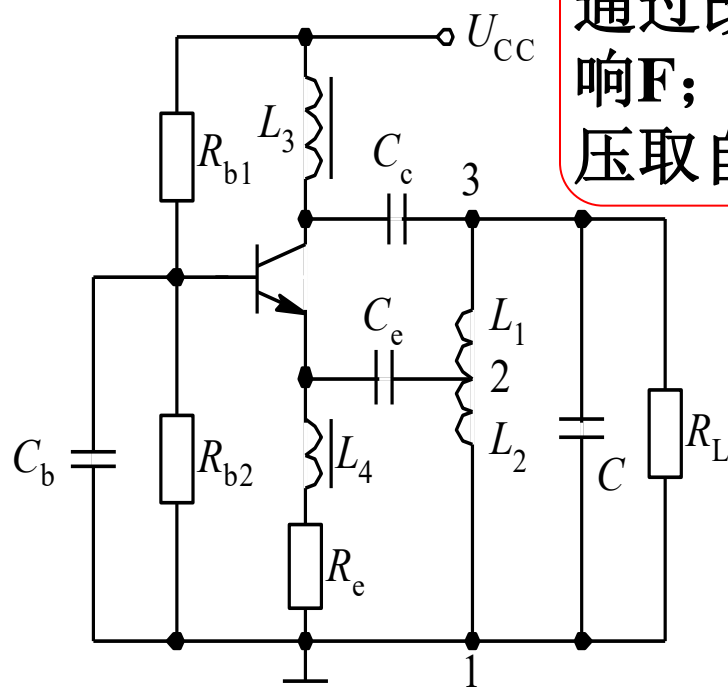
(a)

接入系数 $n = \frac{N_{12}}{N_{13}} = \frac{L_2 + M}{L_1 + L_2 + 2M} = F$
(M为互感系数)

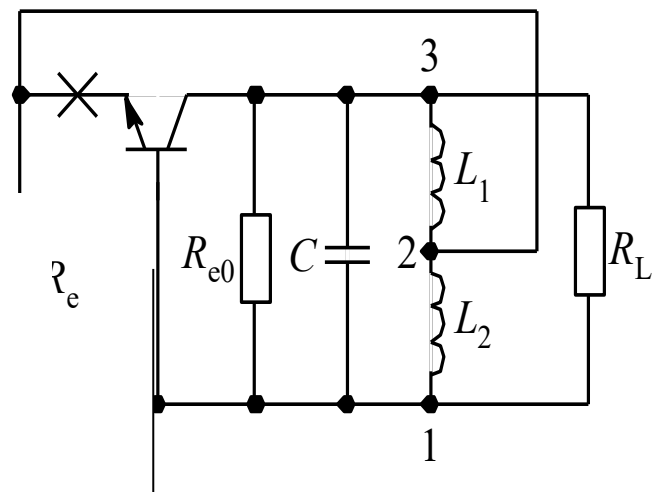


(b) 交流电路

通过改变回路电容调整频率时，基本不影响 F ；但产生信号的频率较低；由于反馈电压取自 L_2 ，使输出含有较大的谐波电压。



(a)



(b)

反馈系数: $F = n = \frac{L_2 + M}{L_1 + L_2 + 2M} (1/10 \rightarrow 1/2)$

$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}$, 其中 $L = L_1 + L_2 + 2M$

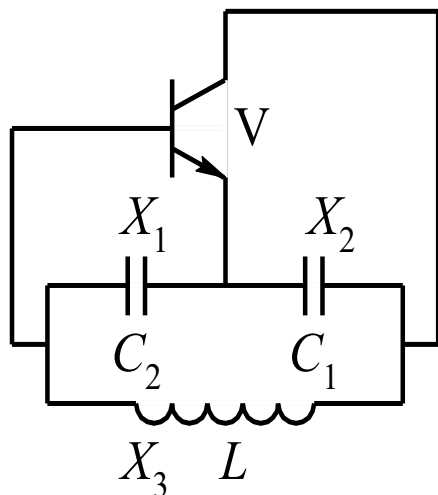
起振条件: $g_m > \frac{1}{n} g'_L + n g_e$ 其中 $g'_L = \frac{1}{R'_L} = \frac{1}{R_L // R_{e0}}$, $g_e = \frac{1}{r_e}$



主要优缺点

- **优点：易起振、输出电压幅度大，调节频率方便（在较宽的频段内）。**
- **缺点：电感作为输出、反馈元件，输出波形不理想、振荡频率不高。**

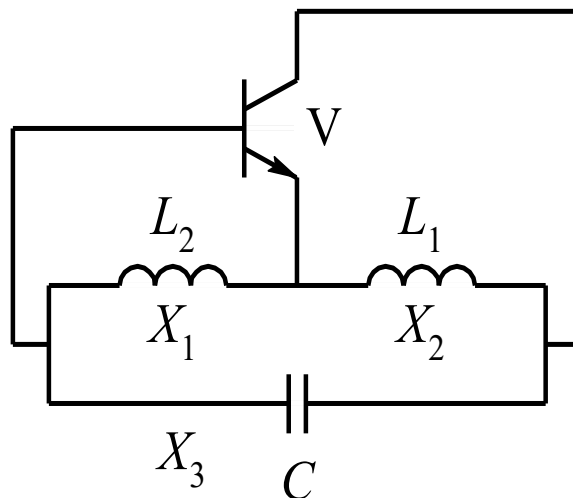
两种三点式的优缺点比较:



(a)

$$F = n = \frac{c_1}{c_1 + c_2}$$

波形好, 但调 f_o 不方便

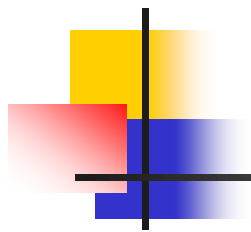


(b)

$$F = n = \frac{L_2 + M}{L_1 + L_2 + 2M}$$

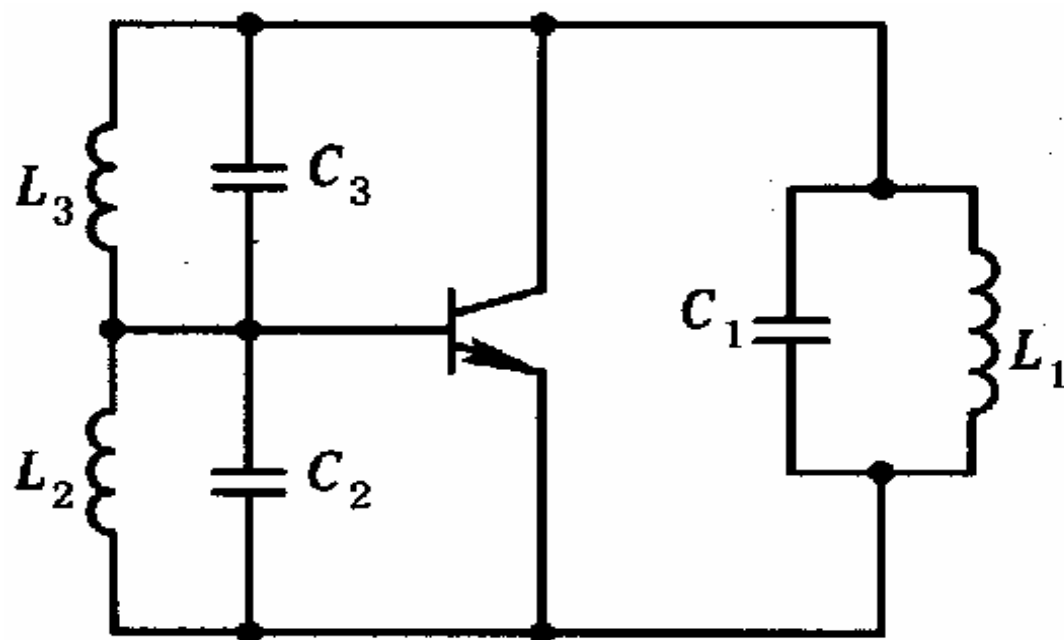
调 f_o 方便, 但波形不好

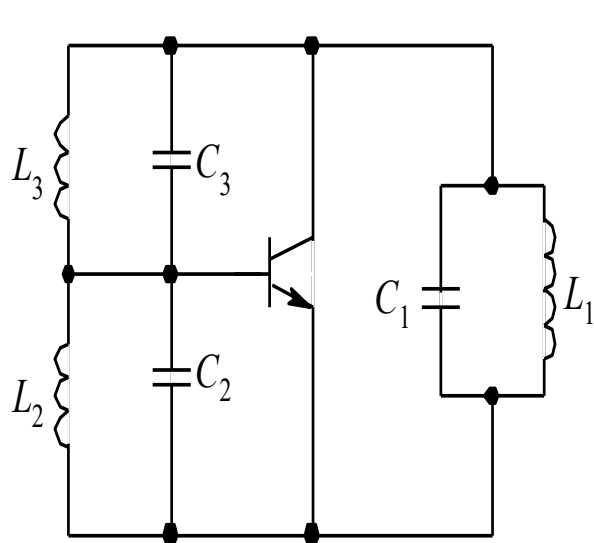
共同的缺点: 频率稳定度不高 (10^{-3}), 受 C_o , C_i 影响。



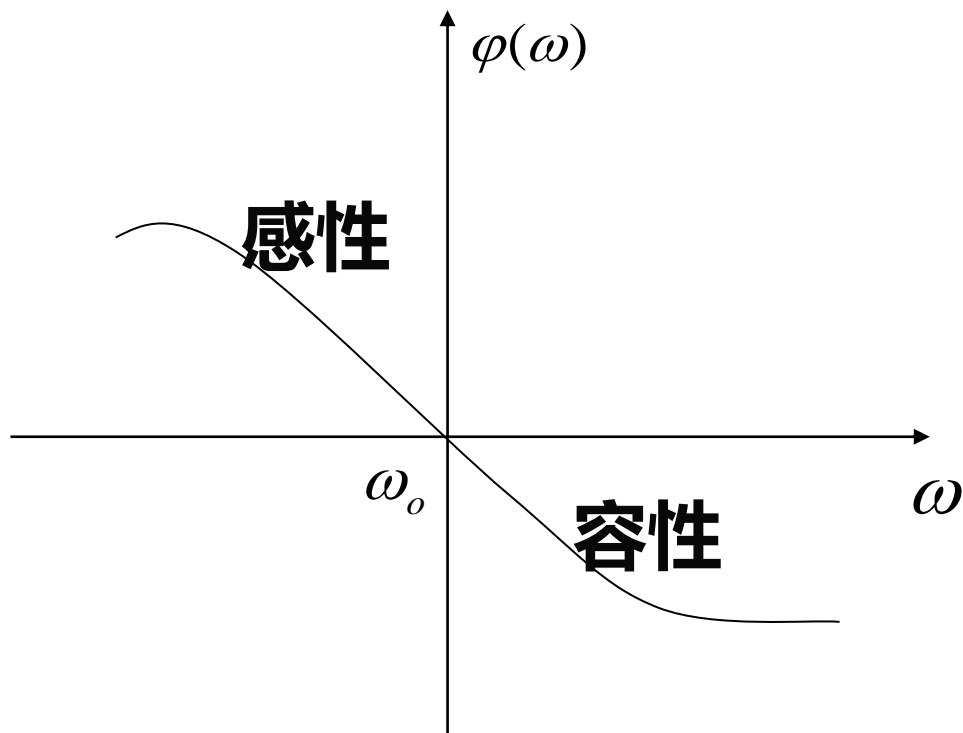
例题1、2、3、4自看

例1 图示振荡器交流等效电路中，三个LC并联回路的谐振频率分别是： $f_1=1 / (\sqrt{L_1C_1})$ ， $f_2=1 / (\sqrt{L_2C_2})$ ， $f_3=1 / (\sqrt{L_3C_3})$ ，试问 f_1 、 f_2 、 f_3 满足什么条件时该振荡器能正常工作？且相应的振荡频率是多少？





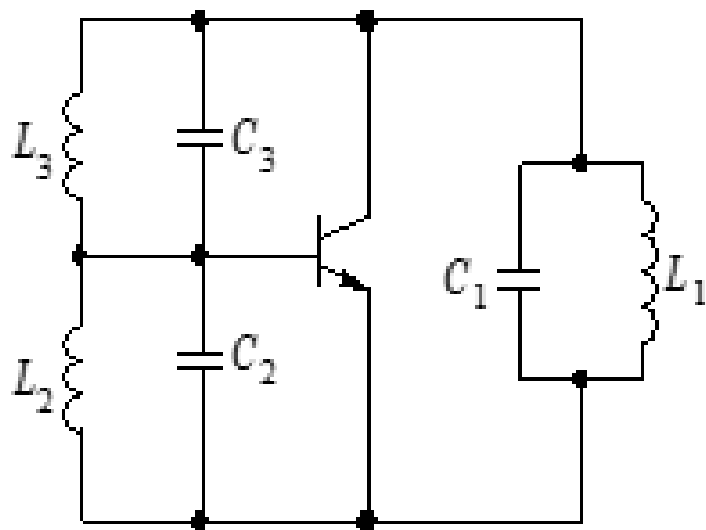
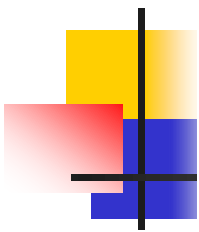
(a)



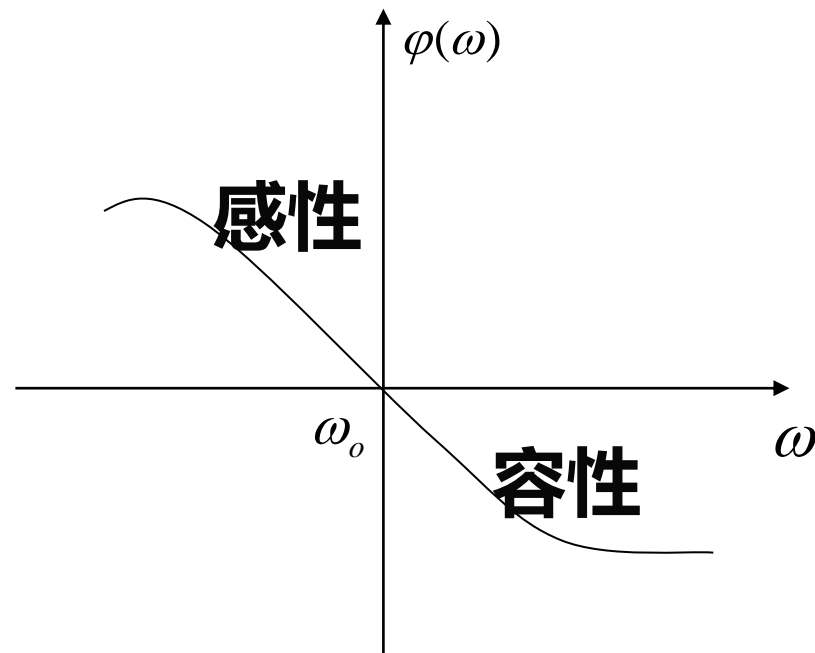
若要组成电容三点式：

则在振荡频率 f_{01} 处， $L_1 C_1$ 回路与 $L_2 C_2$ 回路应呈现容性， $L_3 C_3$ 回路应呈现感性。

$$\mathbf{f}_2, \mathbf{f}_1 < \mathbf{f}_{01} < \mathbf{f}_3$$



(a)



若要组成电感三点式：

则在振荡频率 f_{02} 处， $L_1 C_1$ 回路与 $L_2 C_2$ 回路应呈现感性， $L_3 C_3$ 回路应呈现容性。

$$f_2, f_1 > f_{02} > f_3$$

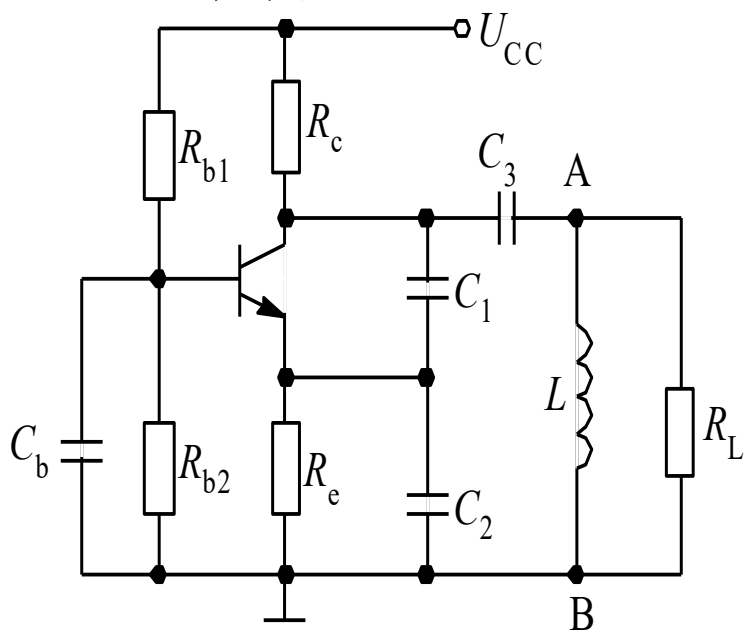
两种改进型电容反馈式振荡器

引入：晶体管各个电极与电抗元件并联，极间电容对振荡器的影响很大，为**提高频率稳定性**，要尽量减小晶体管与回路的耦合。

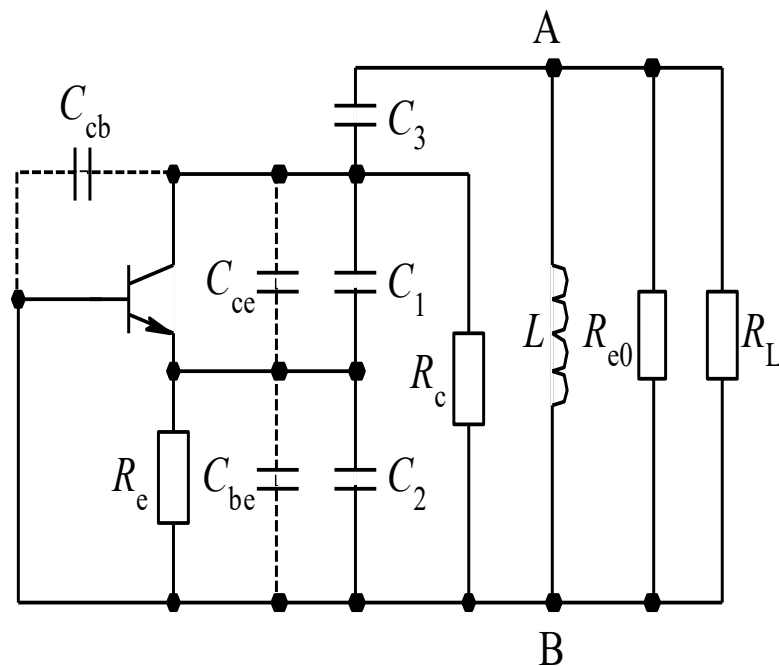
4. 串联改进型电容三点式电路 (克拉泼(Clapp)电路)

$$C_3 \ll C_1, C_2$$

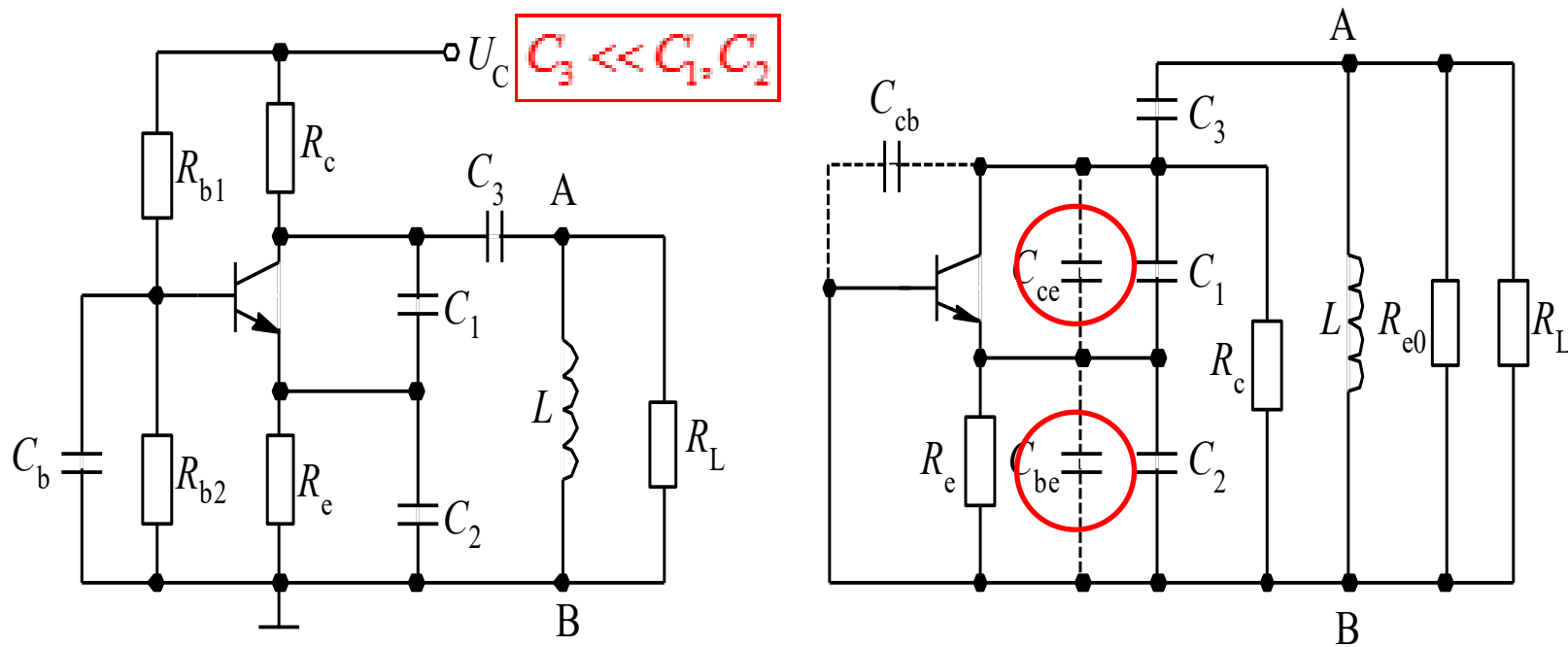
(1) 线路特点



(a)



(b)



(a) 图 4.3.6 克拉泼振荡电路 (b)

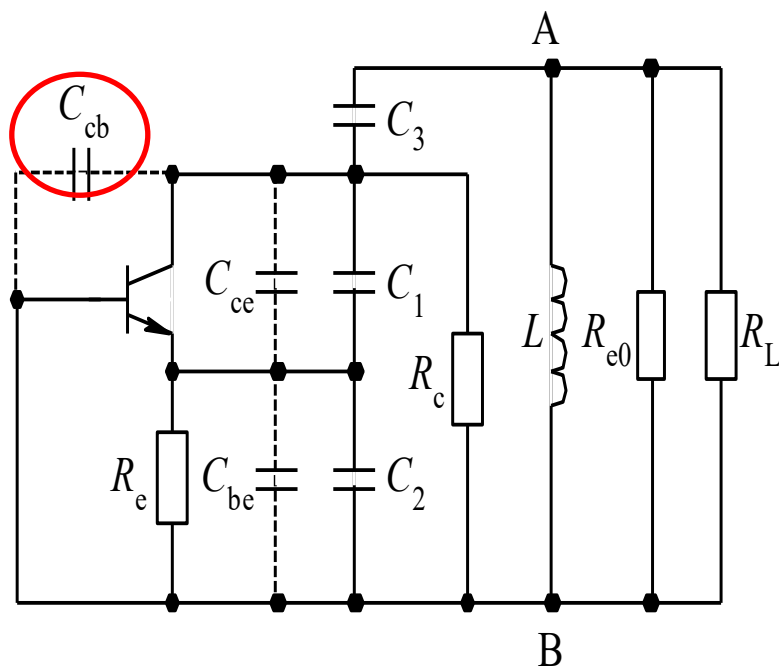
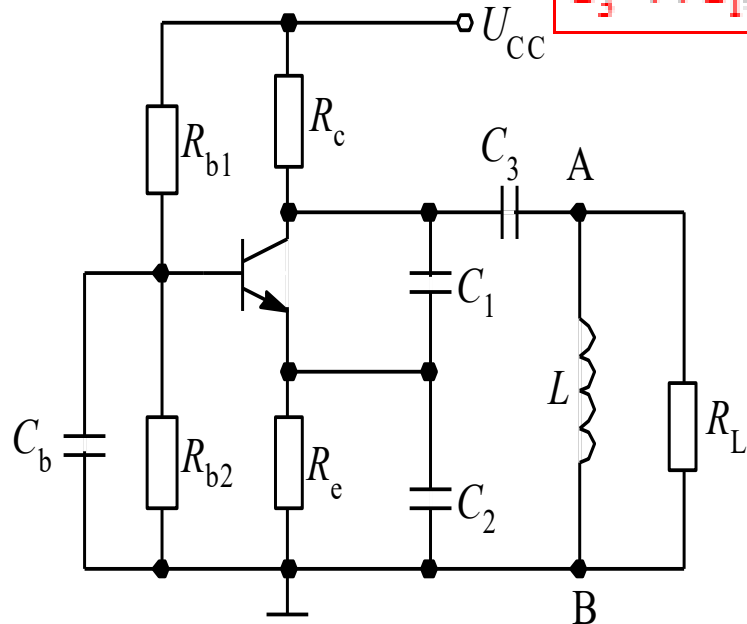
C_{ce} 、 C_{be} 与谐振回路的接入系数:

$$n'_{ce} = \frac{V_{ce}}{V_{AB}} = \frac{C_2 \text{串} C_3}{C_1 + (C_2 \text{串} C_3)} = \frac{C_2}{\frac{C_1 C_2}{C_3} + C_1 + C_2} < C_2 / (C_1 + C_2)$$

同理, $n'_{be} = \frac{V_{be}}{V_{AB}} < C_1 / (C_1 + C_2)$

接入系数减小, 等效电容值也减小, 对 f_0 的影响也减小。

$$C_3 \ll C_1, C_2$$



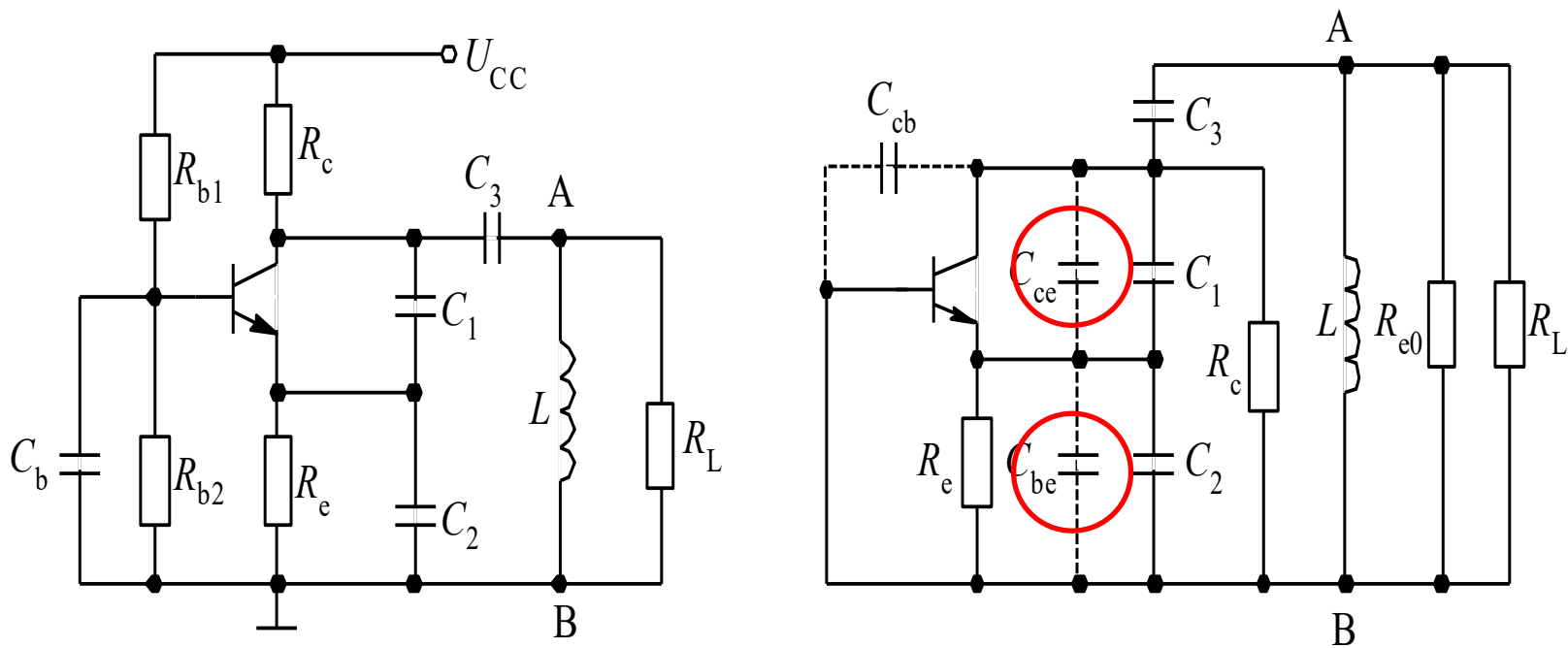
(a) 图 4.3.6 克拉泼振荡电路 (b)

C_{bc} 与谐振回路AB的接入系数:
$$n_1 = \frac{C_3}{C_3 + C_1 C_2 / (C_1 + C_2)} = \frac{1}{1 + C_1 C_2 / [C_3 (C_1 + C_2)]}$$

起振条件:

谐振回路两端的 R_L 折算到cb两端（集电极端）后为:

$$R_L'' = n_1^2 (R_{e0} // R_L) = n_1^2 R_L' < R_L' \quad \text{不利于起振}$$



(a) 图 4.3.6 克拉泼振荡电路 (b)

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

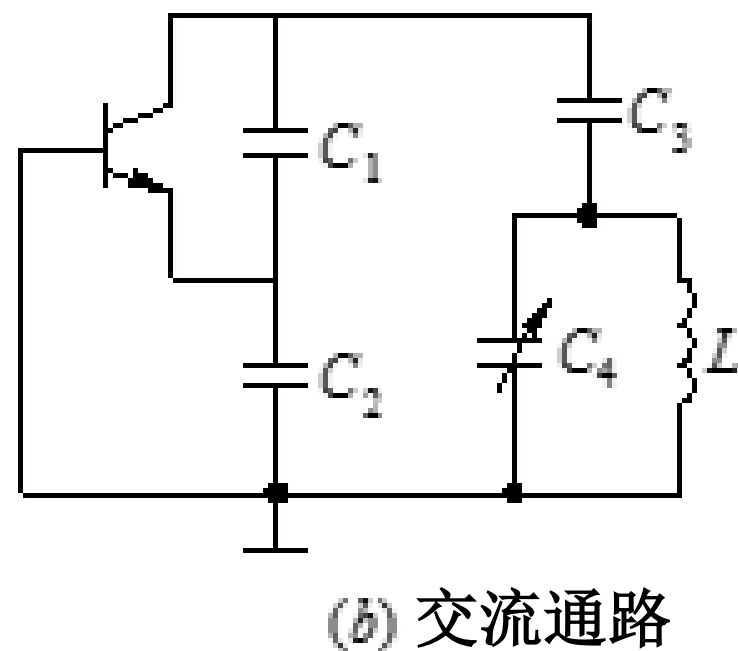
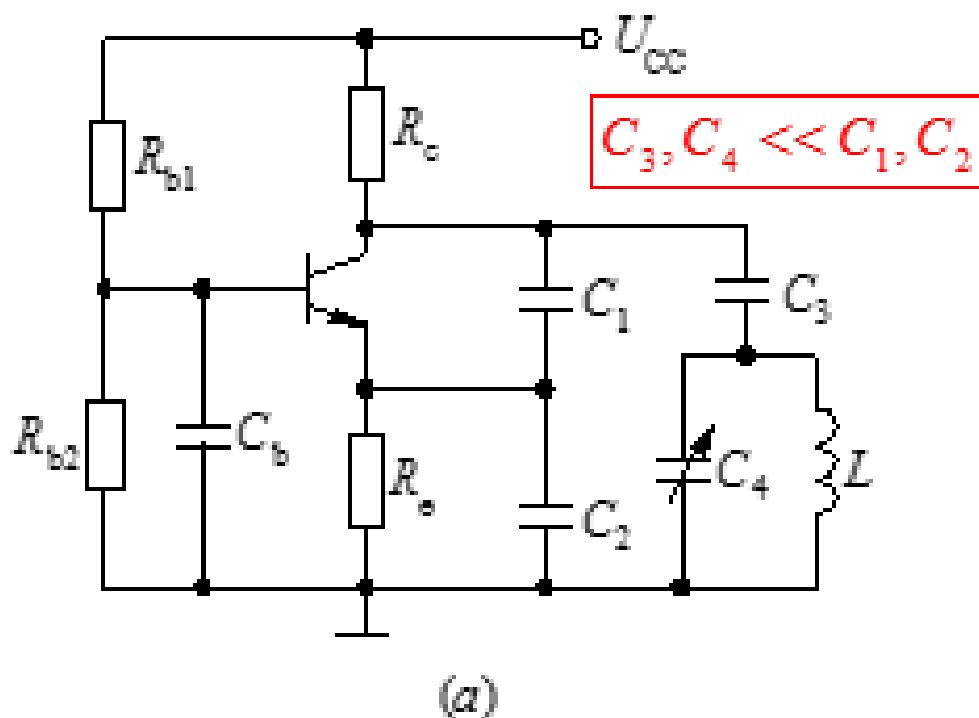
$$C = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)^{-1} \approx C_3$$

频率稳定度变好

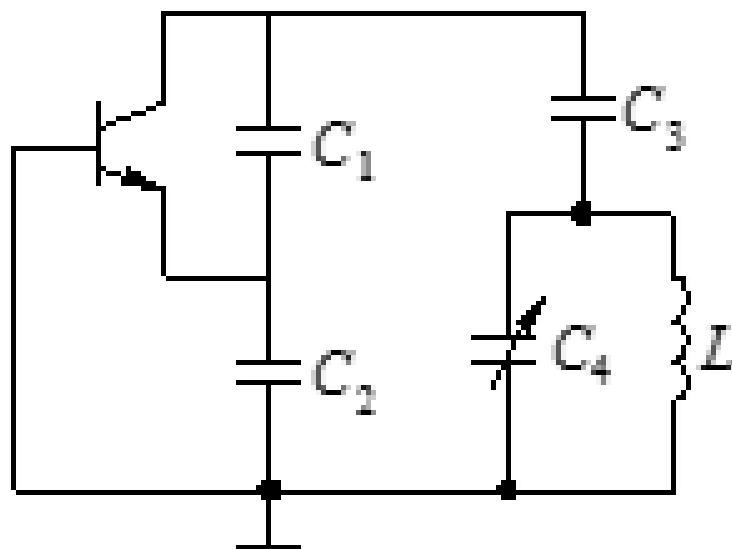
环路增益降低，换取回路标准性提高。 C_3 不能取得太小，否则将影响振荡器的起振。

5 并联改进型电容反馈三点式电路 ——西勒(Seiler)电路

(1) 线路特点



(2) 振荡频率

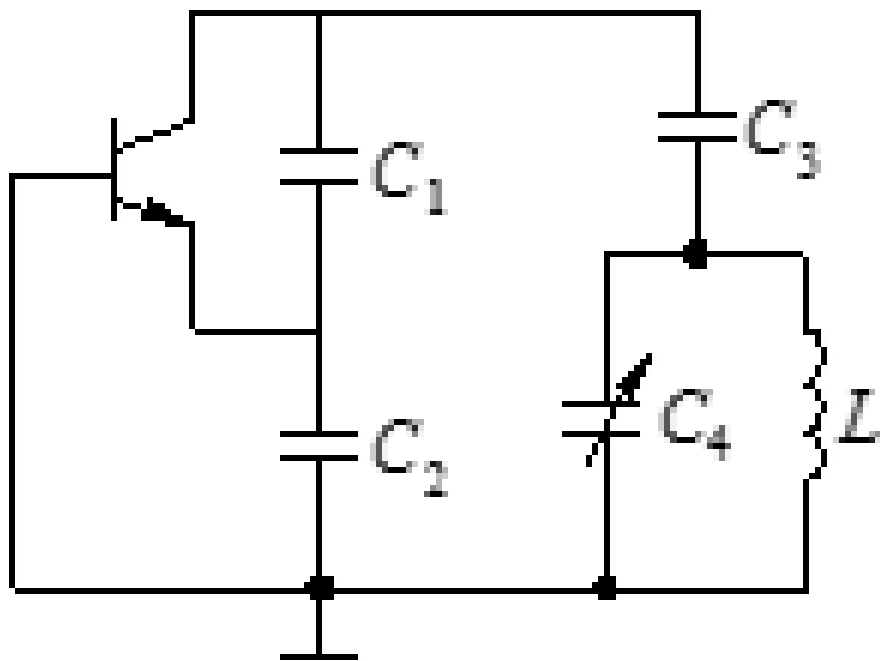


(b) 交流通路

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

$$C = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)^{-1} + C_4 \approx C_3 + C_4$$

通过 C_4 可
调整频率



接入系数与克拉泼电路相同，
共基电路的等效负载

$$R_L'' = n_1^2 R_L' = \left[\frac{1}{\frac{C_1 C_2}{C_3 (C_1 + C_2)} + 1} \right]^2 R_L' < R_L'$$

与克电路同。 C_4 的变化对三极管对回路接入系数 n_1 和 F 都不改变，展宽了工作频带，常用于频率可调的振荡器。



(3) 西勒电路的优点

频率稳定度高，振荡频率高，输出振幅稳定均匀，适合作波段振荡器，其波段覆盖系数为1.6 ~ 1.8左右。



(1).互感耦合振荡器

(2).电容三点式电路(考毕兹(Copplitts)电路)

(3).电感三点式电路(哈特莱(Hartley)电路)

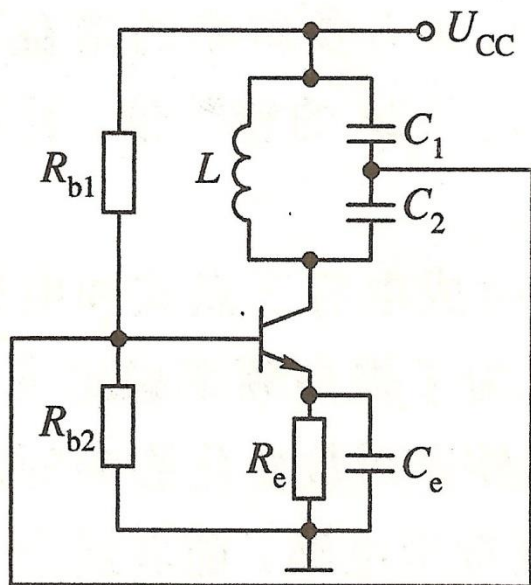
} **10^{-3}**

(4).克拉泼(Clapp)电路

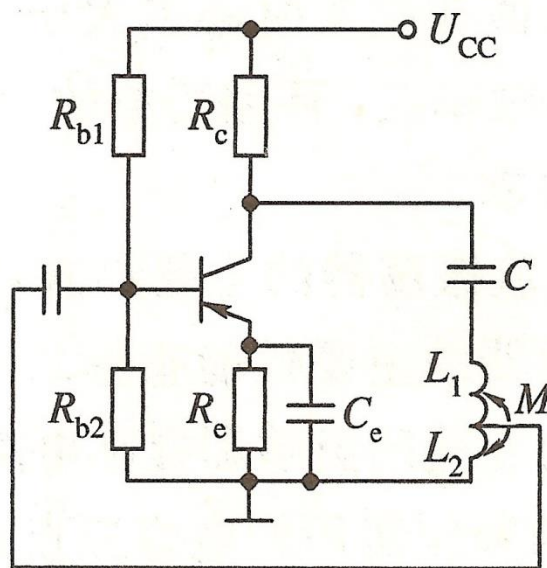
(5).西勒(Seiller)电路

} **$10^{-4} \sim 10^{-5}$**

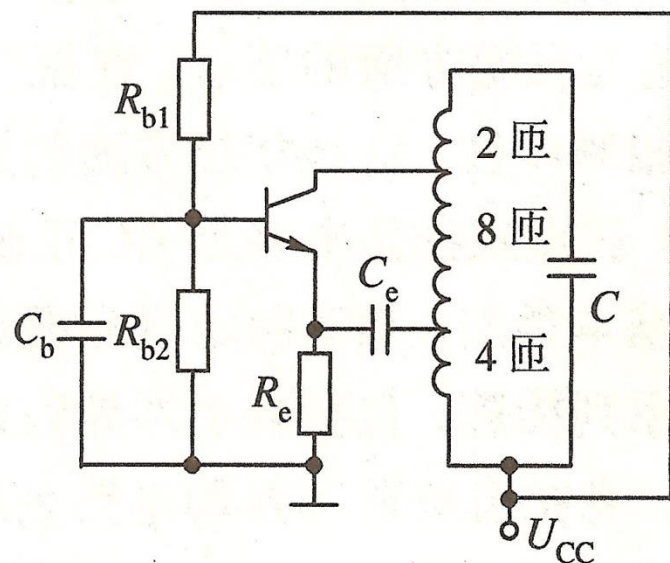
LC振荡器的频率稳定度不高。



(a) 不能



(b) 不能



(c) 能

例 [习题4.2(P102)] :

图示各振荡电路中,

哪些能产生振荡?

哪些不能产生振荡?



4.4 晶体振荡器

4.4.1 石英晶体的结构和特性

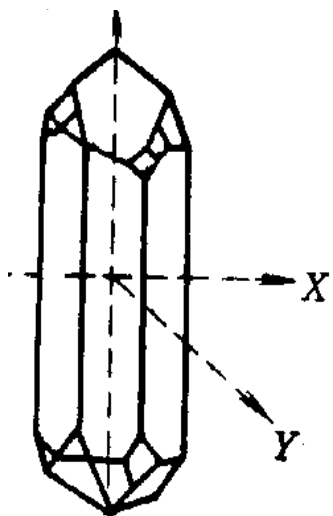
4.4.2 石英谐振器的等效电路与电抗特性曲线

4.4.3 晶体振荡器电路

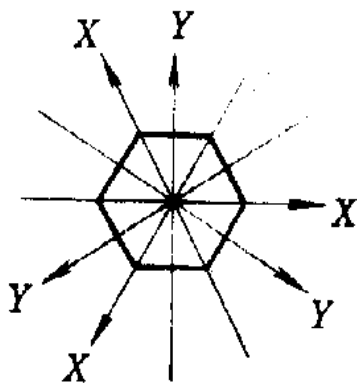
4.4.4 石英晶体振荡器的优缺点

4.4.1 石英晶体的结构和谐振特性

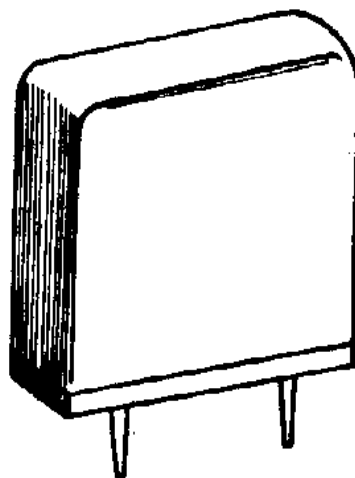
1. 结构（俗称水晶，是一种化学成分为 SiO_2 两端呈角锥的六棱柱结晶体。



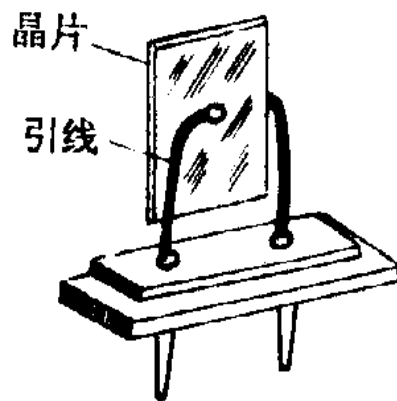
(a)



(b)

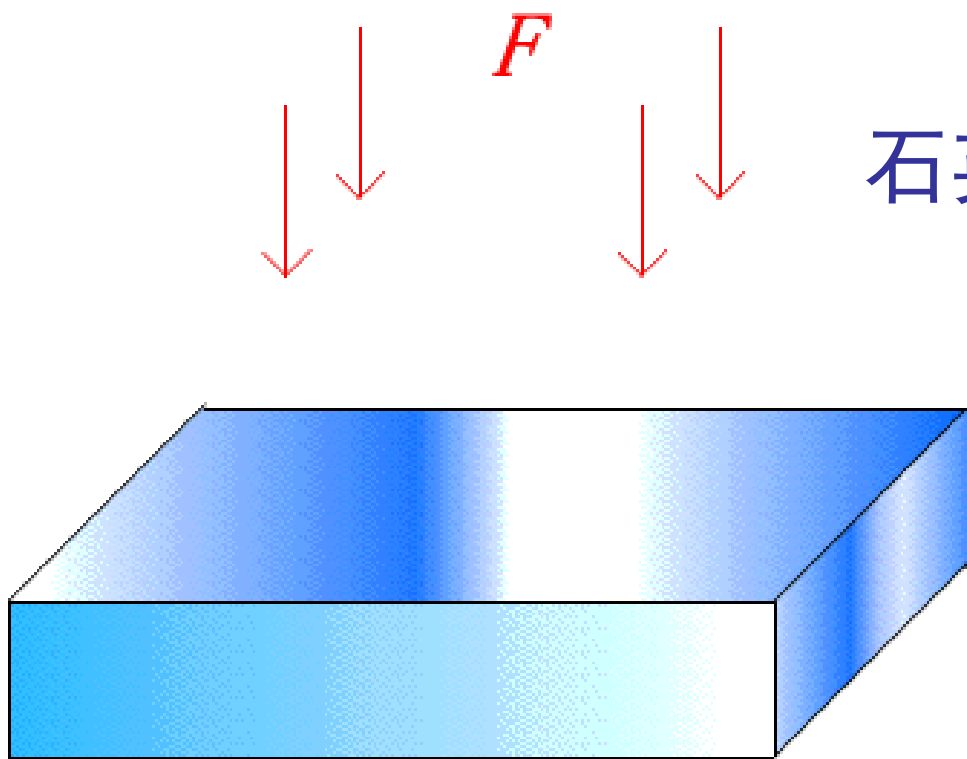


晶体外形



内部结构

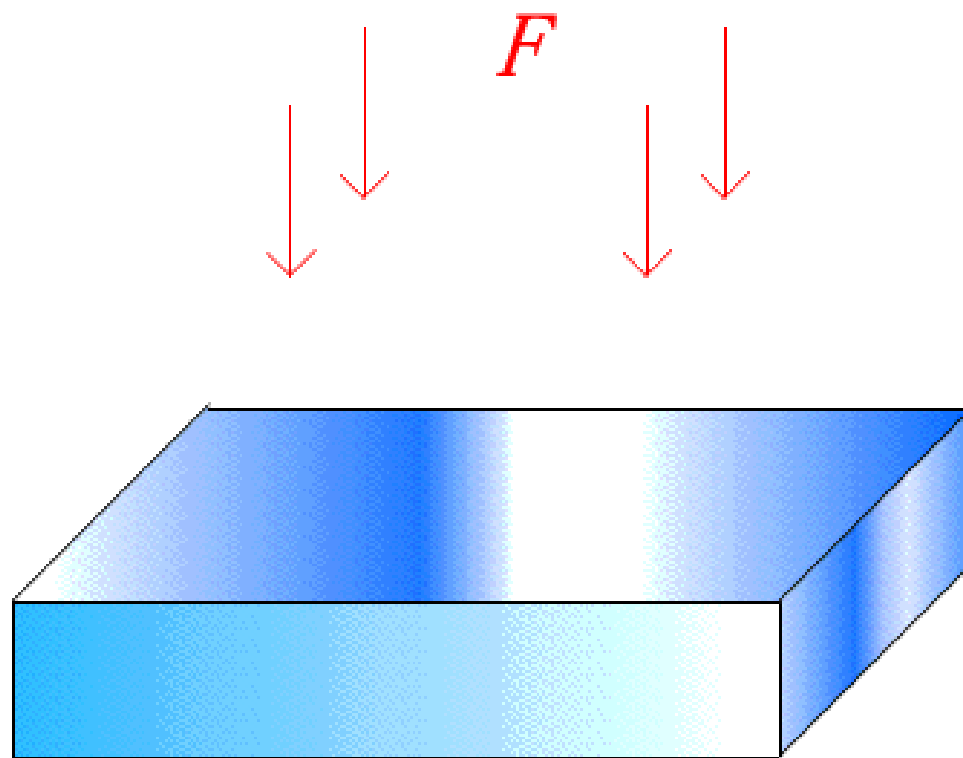
2. 压电特性和反压电特性



石英晶体的压电效应演示

若在晶片的两个极板间加一电场，会使晶体产生机械变形；反之，若在极板间施加机械力，又会在相应的方向上产生电场，这种现象称为压电效应。

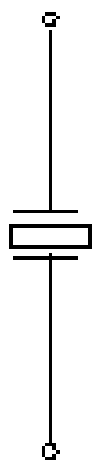
石英晶片可以做成谐振器



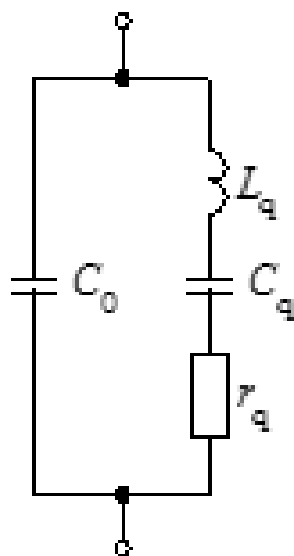
当外加交流电压的频率等于晶片固有的机械振动频率时,晶体片的机械振动最大,晶片两面的电荷量最多,在外电路中的交流电流也最大,便产生了压电谐振。

4.4.2 石英谐振器的等效电路与电抗特性曲线

1. 符号与等效电路



(a)



(b)

其中：

C_0 —金属板及支架构成的电容，
约1~10pF

C_q —压电谐振等效电容，约 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ pF
(晶片的弹性等效)

L_q —压电谐振等效电感，约 $10^{-3} \sim 10^2$ H
(机械振动的惯性等效)

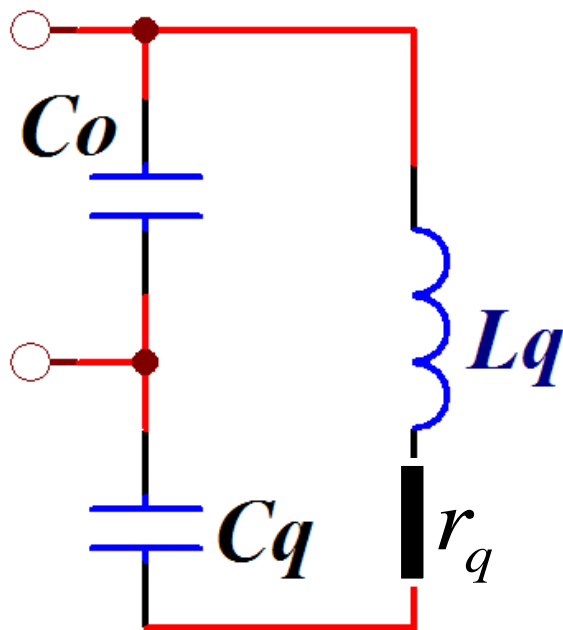
r_q —摩擦损耗电阻，约几十~几百欧姆

$$C_{\Sigma} = C_0 C_q / (C_0 + C_q) \approx C_q$$



石英晶振的特性：

高Q值；接入系数小；频率稳定度高；



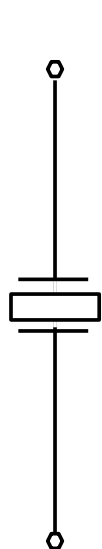
$$Q_q = \frac{\omega_o L}{r} = \frac{1}{r_q} \sqrt{\frac{L_q}{C_q}}$$

(可达几万-几百万)

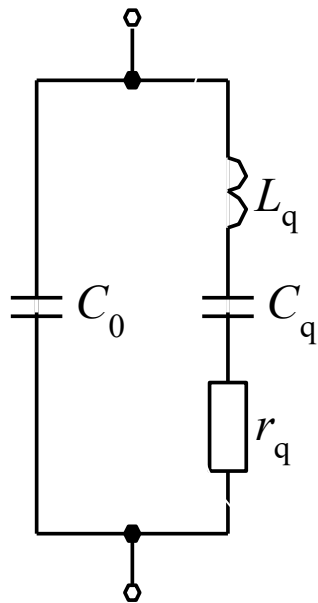
$$n \approx \frac{C_q}{C_0 + C_q}$$

(n很小，故外接元器件参数对石英晶振的影响很小)

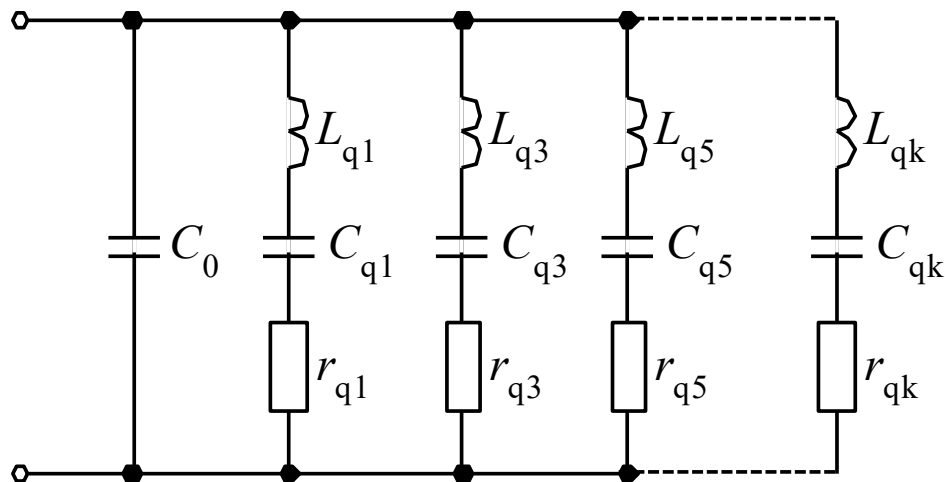
具有多谐性



(a)



(b)

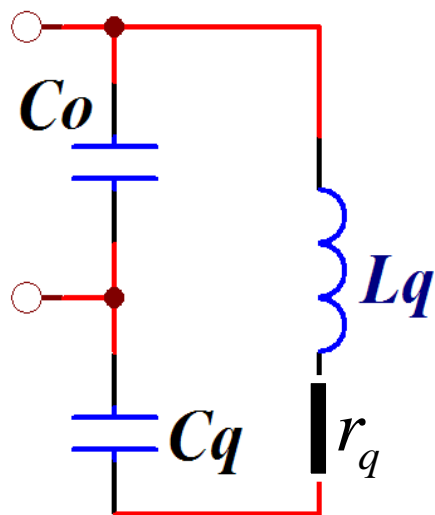


(c)

图 4.4.1 石英晶体谐振器

(a) 符号; (b) 基频等效电路; (c) 完整等效电路(泛音晶体)

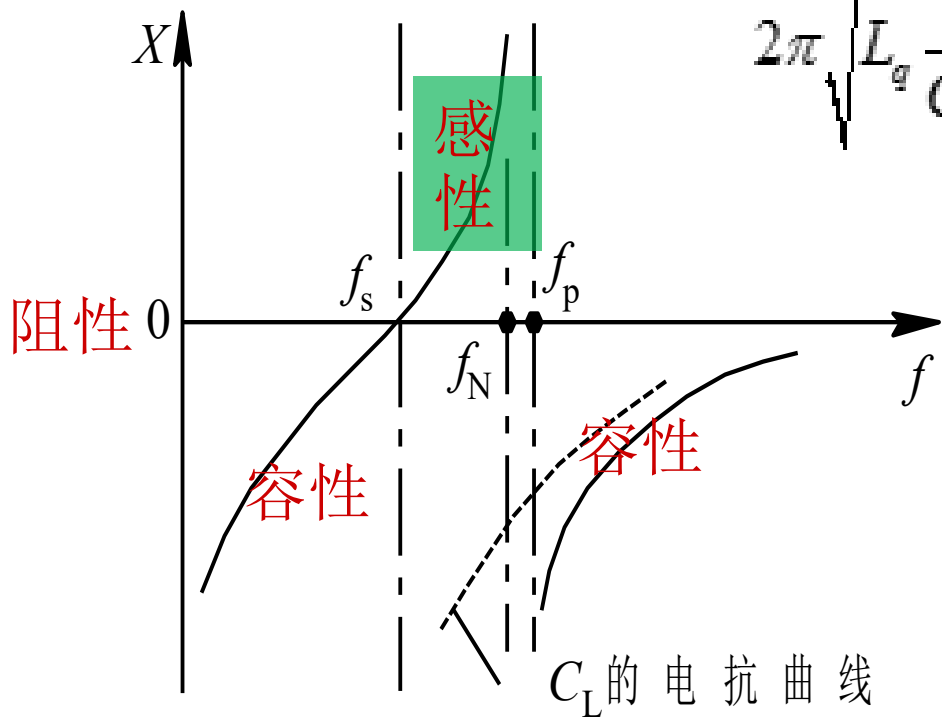
2. 电抗曲线



- 串联谐振频率 $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}}$

- 并联谐振频率

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q \frac{C_0 C_q}{C_0 + C_q}}} = \frac{f_s}{\sqrt{\frac{C_0}{C_0 + C_q}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0}} > f_s$$



只在 $f_s \sim f_p$ 很窄的范围内，石英谐振器等效为一特殊电感，其余频率均等效为电容。



4.4.3 晶体振荡器电路

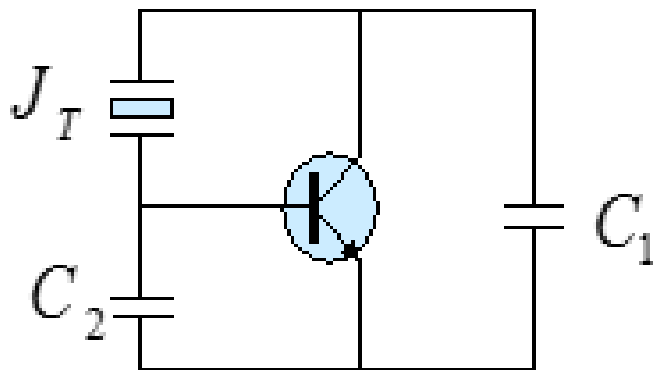
分为两类:

并联型 { **皮尔斯(Picrce)振荡器**
密勒(Miller)振荡器
并联泛音晶体振荡器 } 石英谐振器作为电感

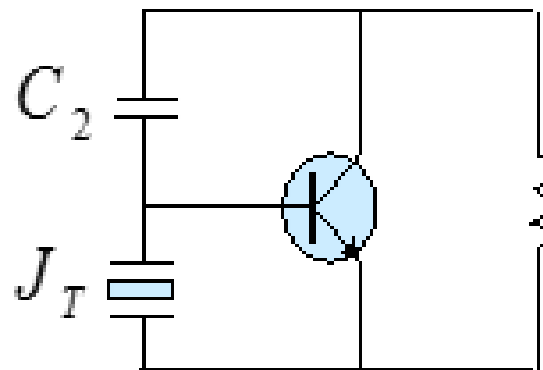
串联型 { **基音串联谐振型晶体振荡器**
串联泛音晶体振荡器 } 石英谐振器作为
高 Q 短路器

1. 并联型晶体振荡器

- 将晶体作为等效电感元件用在三点式电路中，工作在感性区，称为并联型晶体振荡器。



(a) 皮尔斯 (Pierce) 电路

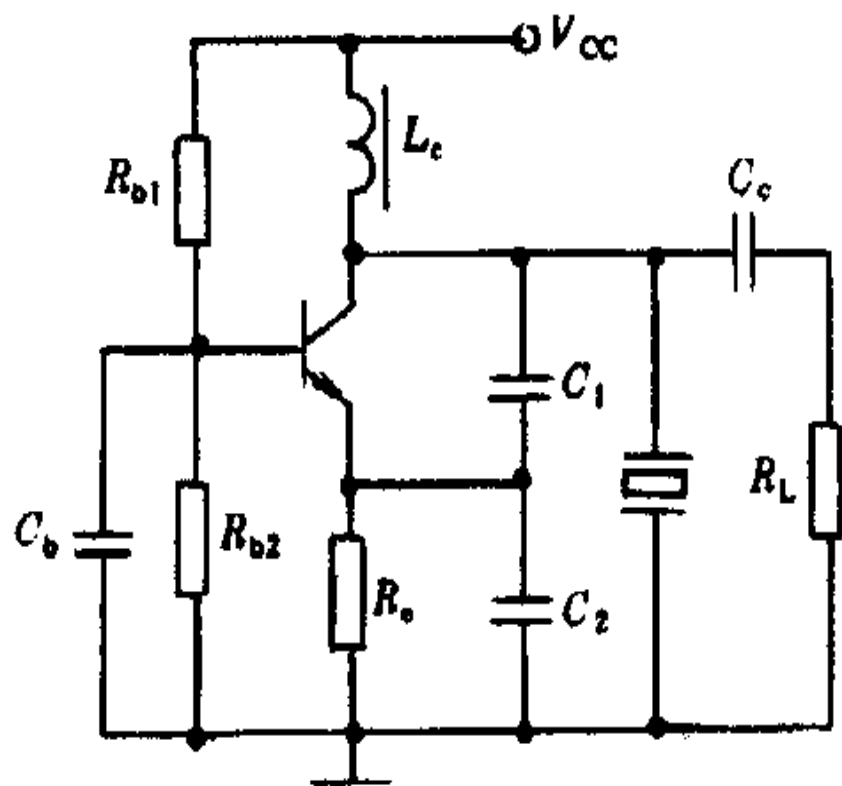


(b) 密勒 (Miller) 电路

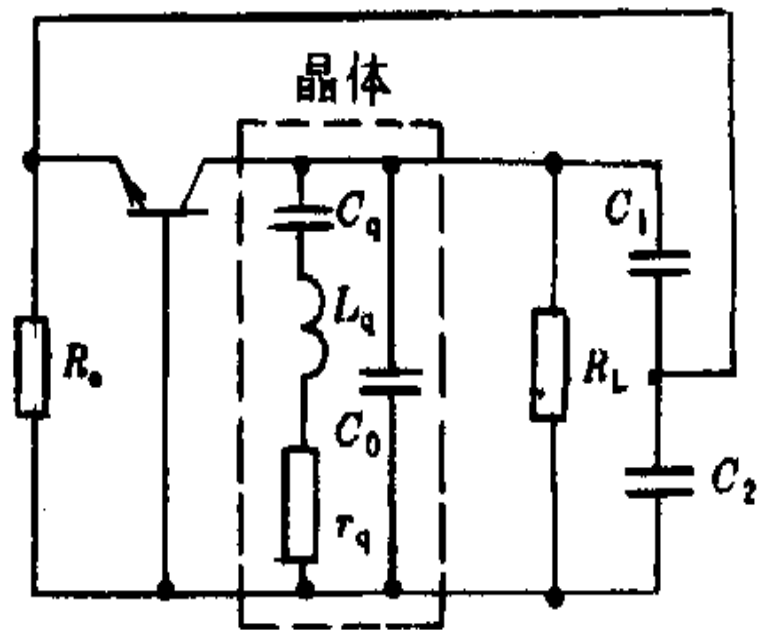
(并联型晶体振荡器的交流等效电路)

皮尔斯电路

振荡器的振荡频率在晶体的串联谐振与并联谐振频率之间，晶体等效为一个非线性电感。



(a)



(b)

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



皮尔斯电路的特点

a. 振荡频率几乎由晶振参数决定，具有高度稳定性。

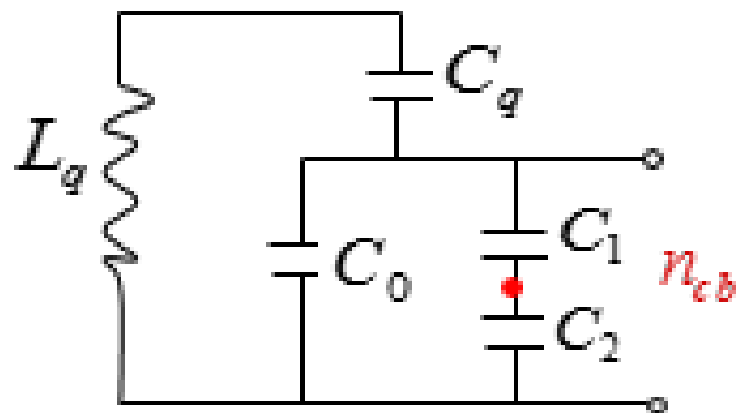
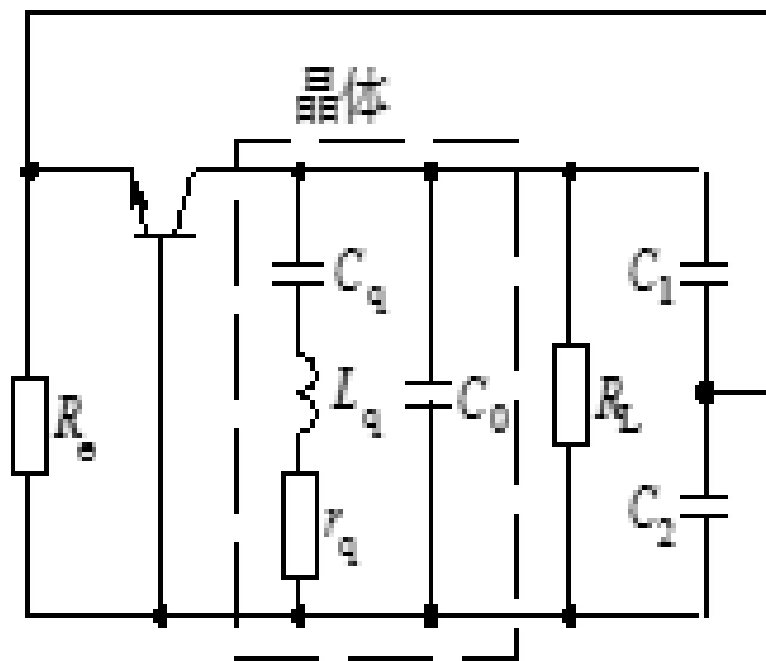
$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q \frac{C_q(C_o + C_L)}{C_q + C_o + C_L}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_o + C_L}} \quad f_s < f_o < f_p$$

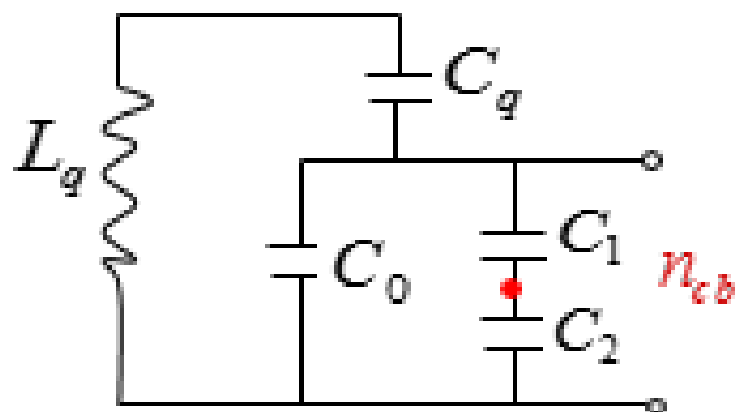
(类似考比兹)

其中， C_L 是和晶振两端并联的外电路各电容的等效值，即产品要求的负载电容。

皮尔斯电路的特点

b. 振荡回路与晶体管、负载之间的耦合很弱，回路标准性提高。





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

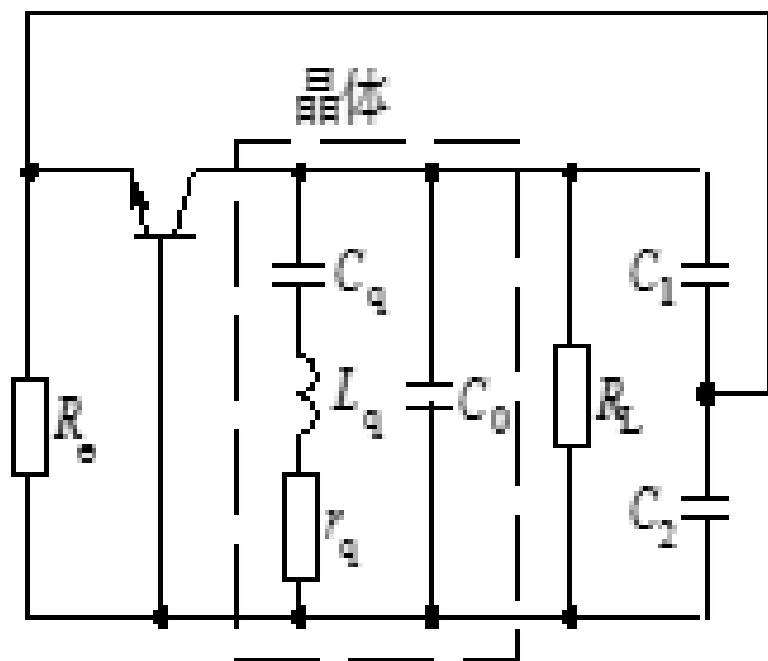
$$n_{cb} = \frac{C_q}{C_q + (C_0 + C_L)}$$

$$n_{ce} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot n_{cb}$$

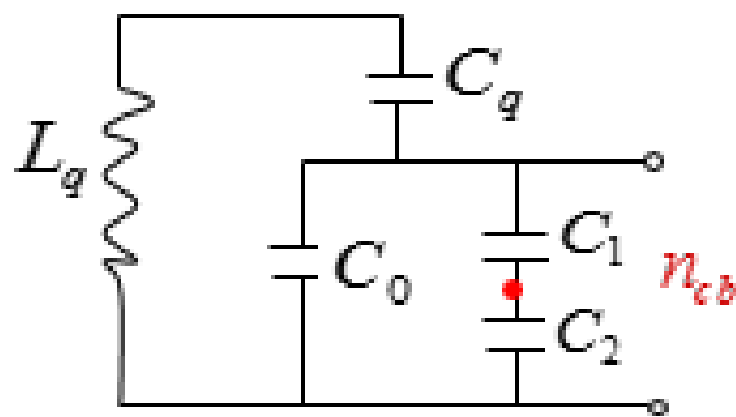
$$n_{eb} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot n_{cb}$$

皮尔斯电路的特点

c. 晶振的谐振电阻高(达 $10^{10}\Omega$)，即使外电路接入系数 n_{cb} 很小，其等效到输出端的输出阻抗仍很大，振幅起振条件易满足。

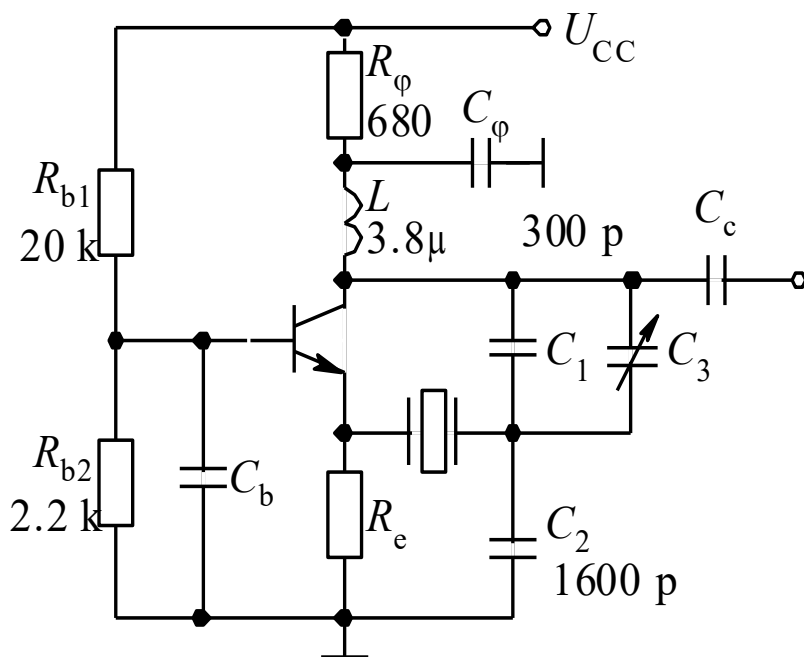


(b)

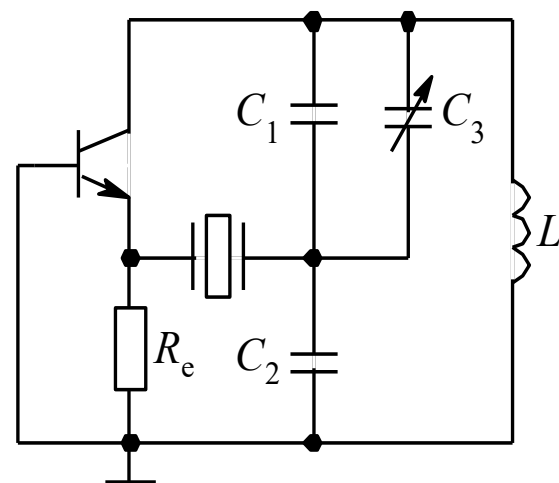


2. 串联型晶体振荡器

将晶体作为一个短路元件串接在正反馈支路中，工作在晶体的串联谐振频率上。



(a) 串联型晶体振荡电路



(b) 高频等效电路

$f_o = f_s$ 等效为一个小电阻



4.4.4 石英晶体振荡器的优缺点

优点：频率稳定度高。

缺点：单频工作