



成都信息工程大学
Chengdu University of Information Technology

高频电子线路

第四章 正弦波振荡电路



成都信息工程大学
Chengdu University of Information Technology

振荡器

不需要外加输入信号的控制，就能自动地将直流电能转换成一定频率和一定幅度的交流电信号的现象，称为自激振荡，能产生自激振荡的电路，称为振荡器。

振荡器的用途

- 产生高频载波

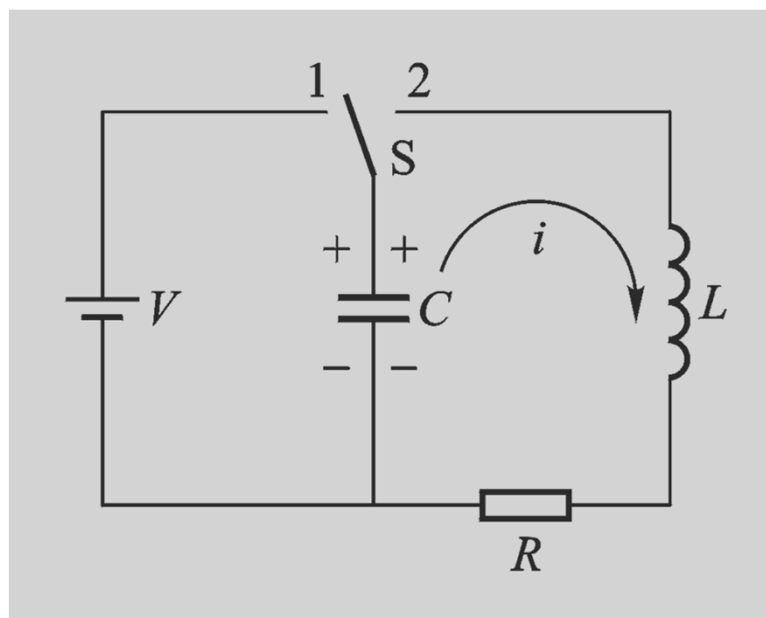
- 产生标准正弦波

- 整型后可以作为数字电路的时钟信号



LC振荡回路

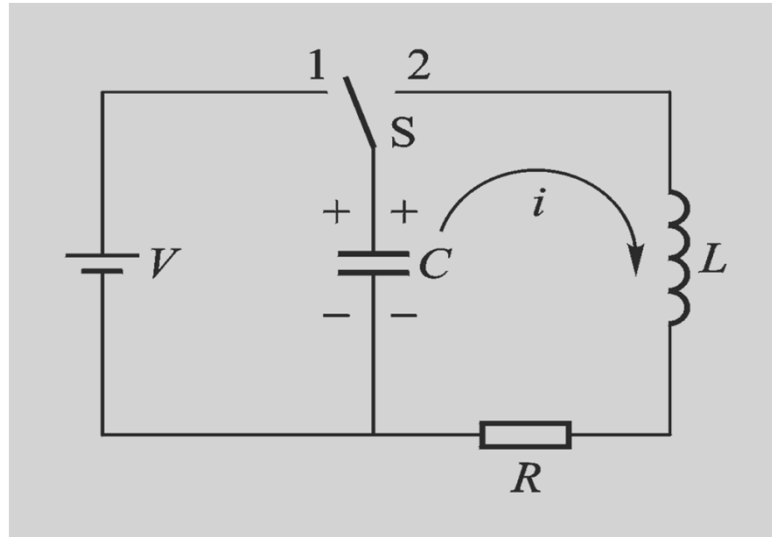
所谓“谐振”，就能量关系而言，是指：回路中储存的能量是不变的，只是在电感与电容之间相互转换；外加电动势只提供回路电阻所消耗的能量，以维持回路的等幅振荡。





成都信息工程大学

Chengdu University of Information Technology



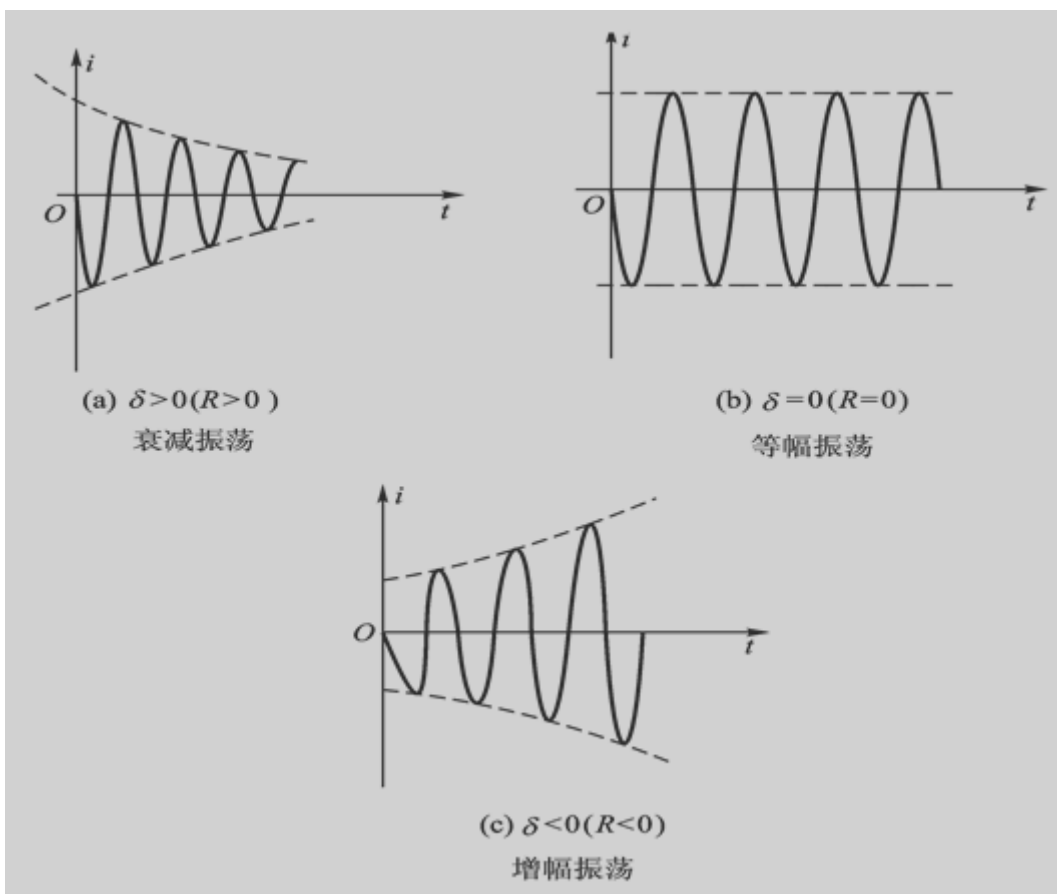
假设开关S先放于1的位置，使电容C最初充电到电压V，然后将S转换到2的位置，C上的电荷即经过L、R放电。由于回路R的存在，振荡的幅度越来越小。

为了获得等幅振荡，就必须设法使LC回路中的电阻等于零。由于实际的LC回路本身总是有正电阻的，因此必须认为地引入一个负电阻，将回路本身的正电阻完全抵消，以获得等幅振荡。

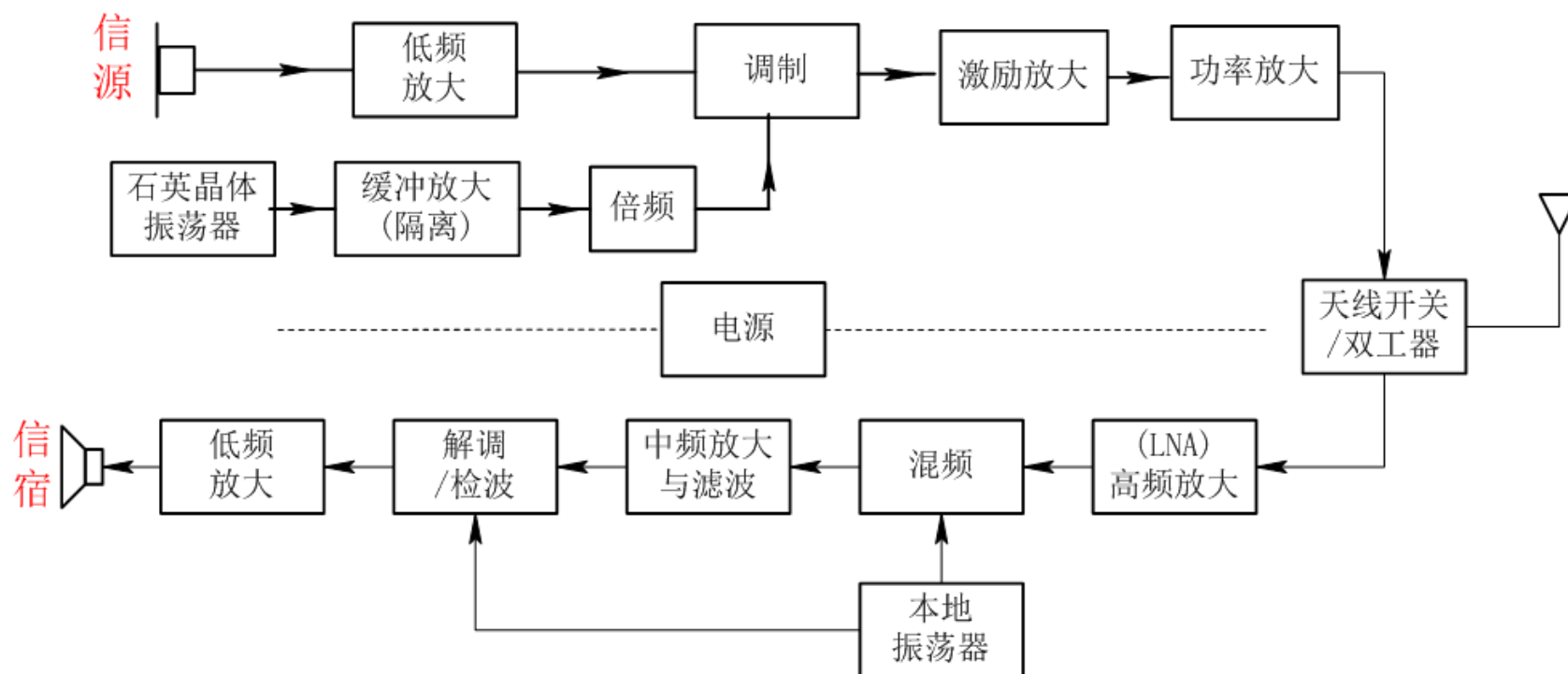


成都信息工程大学

Chengdu University of Information Technology

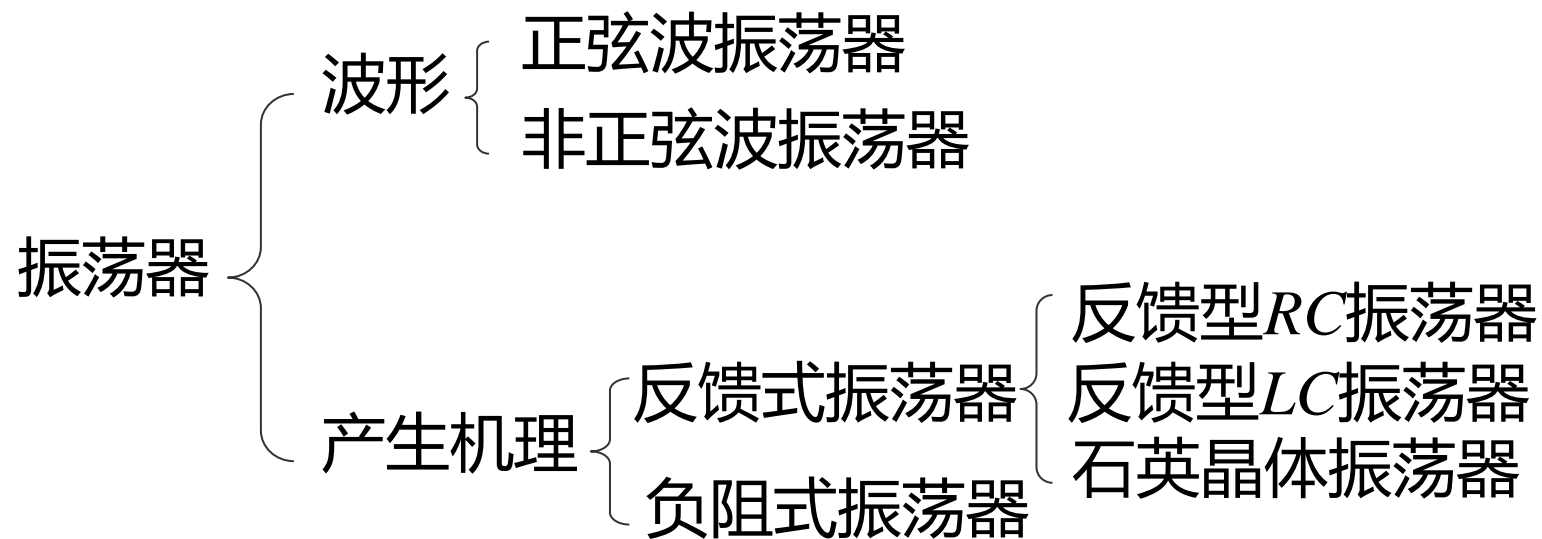


振荡器



振荡器在无线通信系统中的位置

振荡器的分类



构成振荡器的条件

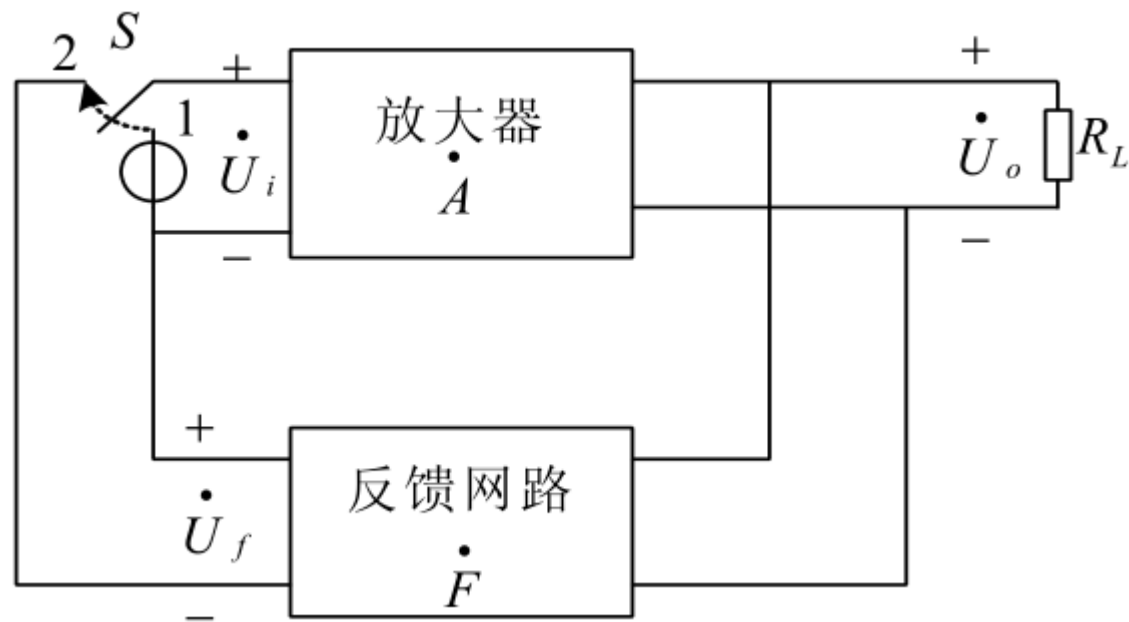
- 1) 一套振荡回路，包含两个（或两个以上）储能元件。在这两个元件中，当一个释放能量时，另一个就接收能量。释放与接收能量可以往返进行，其频率决定于元件的数值。
- 2) 一个能量来源，补充由振荡回路电阻所产生的能量损失。在晶体管振荡器中，这个能源就是直流电源。
- 3) 一个控制设备，可以使电源功率在正确的时刻补充电路的能量损失，以维持等幅振荡。这是由有源器件和正反馈电路完成的。



正弦波振荡器

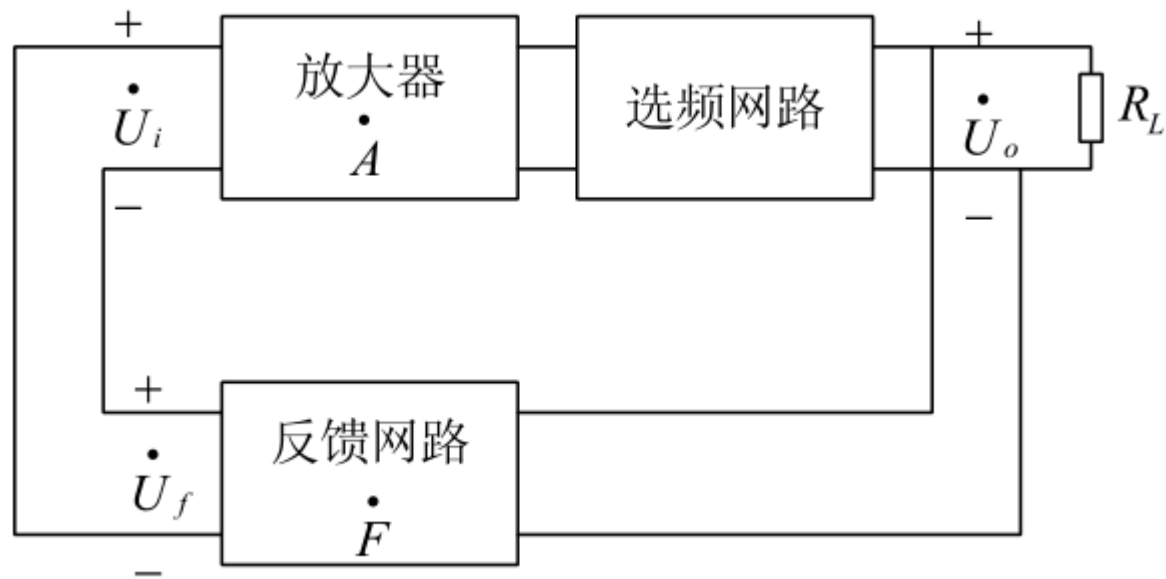
能产生正弦波信号的振荡电路，称为正弦波振荡器。

正弦波振荡器，按组成原理可分成反馈振荡器和负阻振荡器。反馈振荡器是目前应用最多的振荡器，它是建立在放大和反馈基础上的

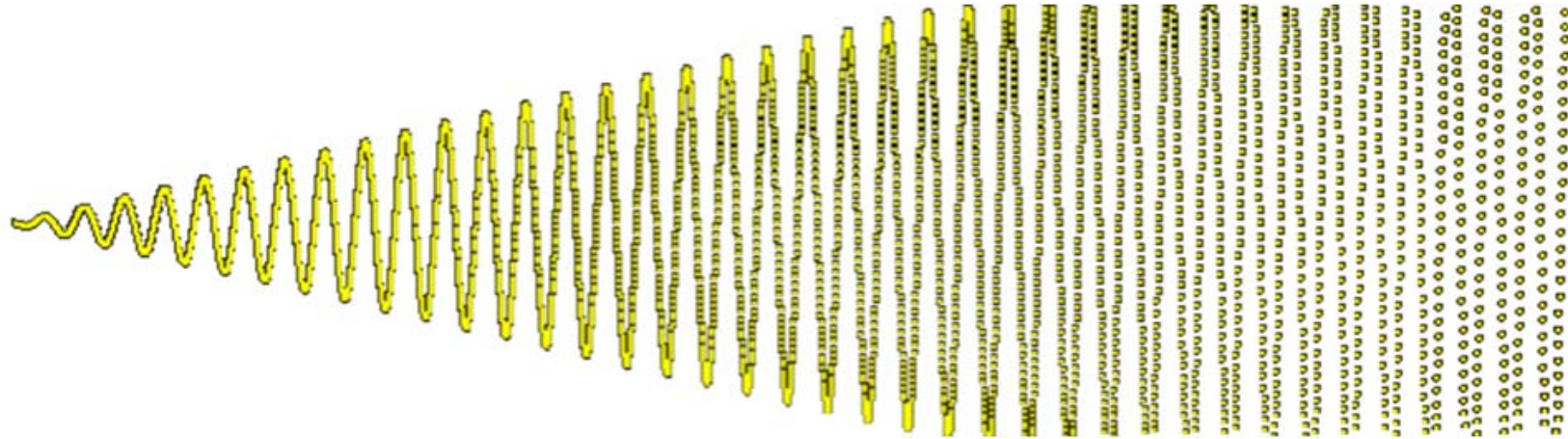


正弦波振荡器

反馈振荡器是不需要通过开关转换由外加信号激励产生输出信号的，它是把反馈电压作为输入信号，以维持一定的输出电压的闭环正反馈系统。反馈振荡器是由放大器和反馈网络所组成的一个闭环环路，其中反馈网络由无源器件组成。但是如果要形成稳定的正弦波输出还需要从产生的振荡信号中“筛选”出所需频率的正弦波。所以正弦波振荡器需要加入选频网路



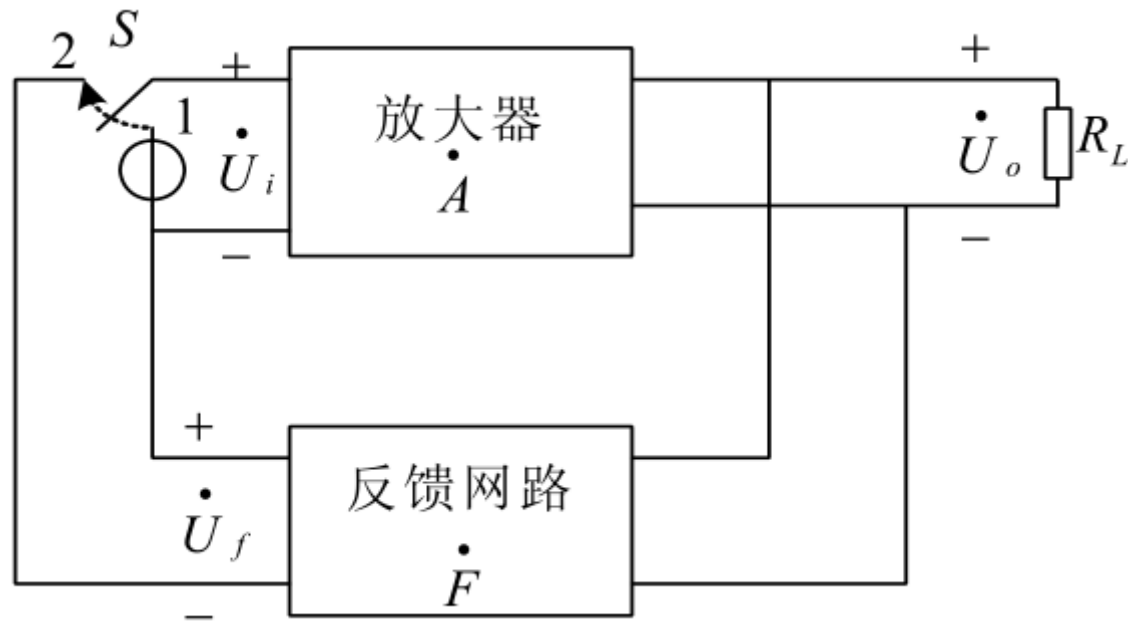
振荡建立过程



当接通电源时，回路内的各种电扰动信号经选频网络选频后，将其中某一频率的信号反馈到输入端，再经放大→反馈→放大→反馈的循环，该信号的幅度不断增大，振荡由小到大建立起来。随着信号振幅的增大，放大器将进入非线性状态，增益下降，当反馈电压正好等于输入电压时，振荡幅度不再增大进入平衡状态。

一个反馈振荡器要正常的工作，必须满足三个条件：**起振条件**、**平衡条件**以及**稳定条件**。

振荡器的起振条件和平衡条件



定义环路的闭环增益为 $\dot{T} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_i} = \dot{A}\dot{F}$

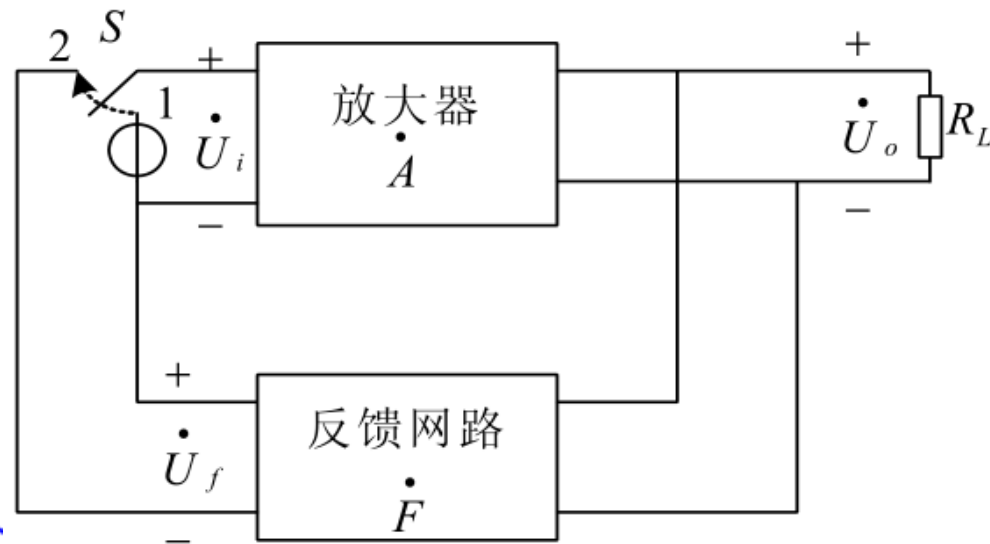
$$\dot{A} = A e^{j\varphi_A} ; \quad \dot{F} = F \cdot e^{j\varphi_F} \quad \dot{T} = \dot{A}\dot{F} = A F e^{j(\varphi_A + \varphi_F)}$$

高频电子线路

1. 起振条件

$$\dot{T} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_i} = \dot{A}\dot{F}$$

$$\dot{T} = \dot{A}\dot{F} = AFe^{j(\varphi_A + \varphi_F)}$$



为了使振荡器的输出振荡电压在接通直流电源后由小增大，则要求反馈电压幅度必须大于输入信号幅度，反馈电压相位必须与放大器输入相位相同，也就是要求是正反馈，即

$$T > 1$$

振幅起振条件

$$\varphi_T = 2n\pi$$

相位起振条件

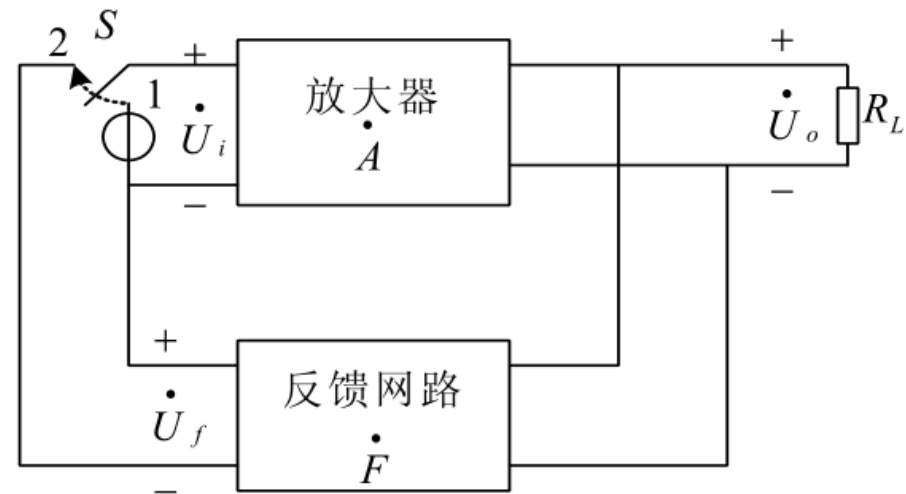
在起振的开始阶段，振荡的幅度还很小，电路尚未进入非线性区，振荡器可以作为线性电路来处理，即可用小信号电路等效模型分析起振条件。



2. 平衡条件

$$T = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_i} = \dot{A}\dot{F}$$

$$\dot{T} = \dot{A}\dot{F} = AFe^{j(\varphi_A + \varphi_F)}$$



振荡幅度的增长过程不会一直无止境地下去，当反馈信号正好等于输出电压所需的输入电压时，振荡幅度不再增大，电路进入平衡状态。则振荡的平衡条件为

$$T = 1$$

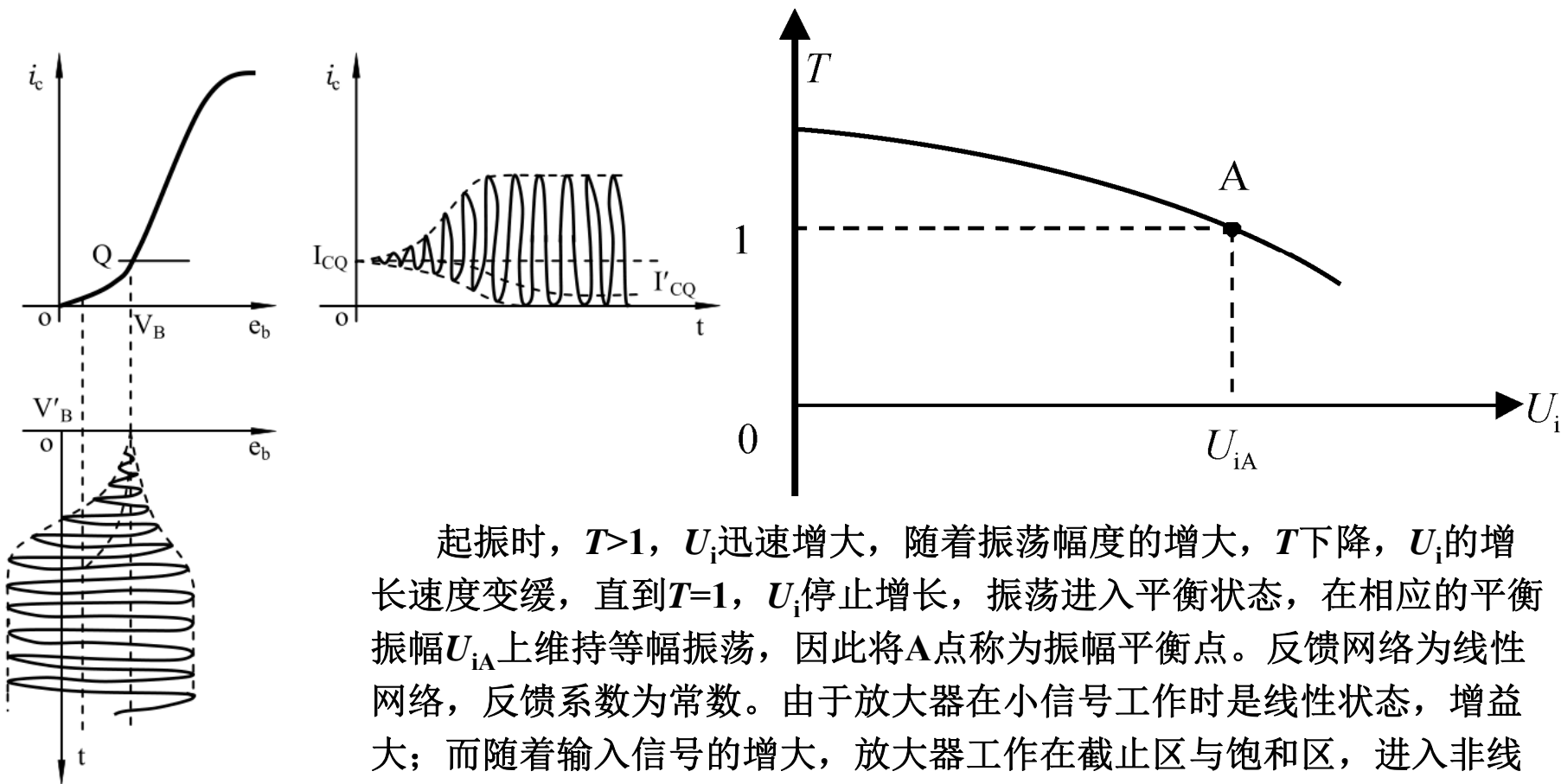
振幅平衡条件

$$\varphi_T = 2n\pi$$

相位平衡条件

综上所述，反馈振荡器既要满足起振条件，又要满足平衡条件，其中起振与平衡的相位条件都是满足正反馈的要求。而对于振幅起振与平衡条件，则要求振荡电路的环路增益具有随振荡器的输入电压的增加而下降的特性。

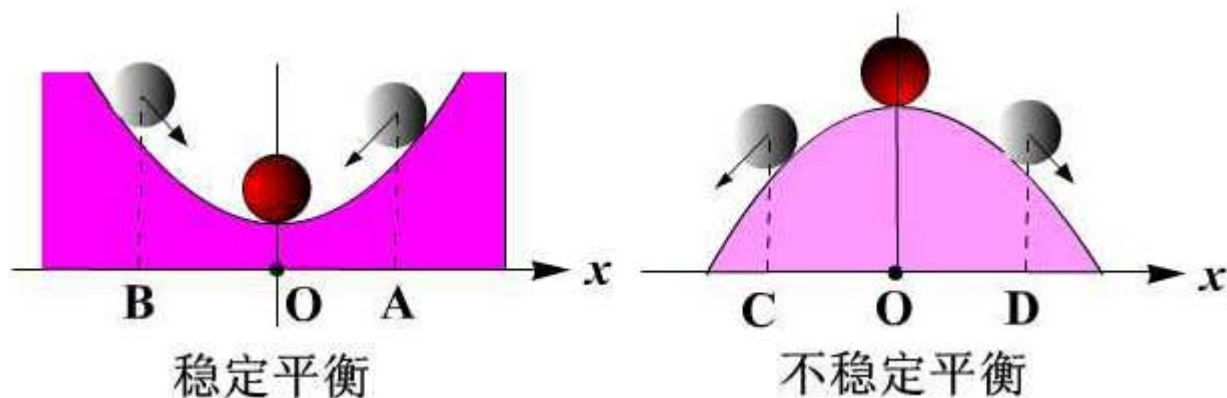
满足起振与平衡条件的环路增益特性



起振时, $T>1$, U_i 迅速增大, 随着振荡幅度的增大, T 下降, U_i 的增长速度变缓, 直到 $T=1$, U_i 停止增长, 振荡进入平衡状态, 在相应的平衡振幅 U_{iA} 上维持等幅振荡, 因此将A点称为振幅平衡点。反馈网络为线性网络, 反馈系数为常数。由于放大器在小信号工作时是线性状态, 增益大; 而随着输入信号的增大, 放大器工作在截止区与饱和区, 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。因此一般放大器的增益特性曲线均满足上图所示的形状。

振荡平衡的稳定条件

振荡器在工作时，不可避免地要受到各种外界因素变化的影响，如温度改变、电源电压波动等，这些变化将使放大器的放大倍数和反馈系数改变，破坏了原来的平衡条件，对振荡器的正常工作将产生影响。如果通过放大与反馈的不断循环，振荡器能够在原平衡点附近建立起新的平衡状态，则原平衡点是稳定的，否则原平衡点是不稳定的。下面分别对振幅稳定条件与相位稳定条件进行讨论。



1. 振幅稳定条件

振幅稳定条件是指振荡器的工作状态在外界各种干扰的作用下偏离平衡状态时，振荡器在平衡点必须具有阻止振幅变化的能力。具体地讲，在振幅平衡点上，当不稳定因素使振荡幅度增大时，环路增益的模值应减小，使反馈电压振幅 U_f 减小，从而阻止 U_i 增大；当不稳定因素使振荡幅度减小时，环路增益的模值应增大，使反馈电压振幅 U_f 增大，从而阻止 U_i 减小。因此要求在平衡点附近，环路增益的模值随 U_i 的变化率为负值，即振幅稳定条件为

$$\left. \frac{\partial T}{\partial U_i} \right|_{U_i=U_{iA}} < 0$$



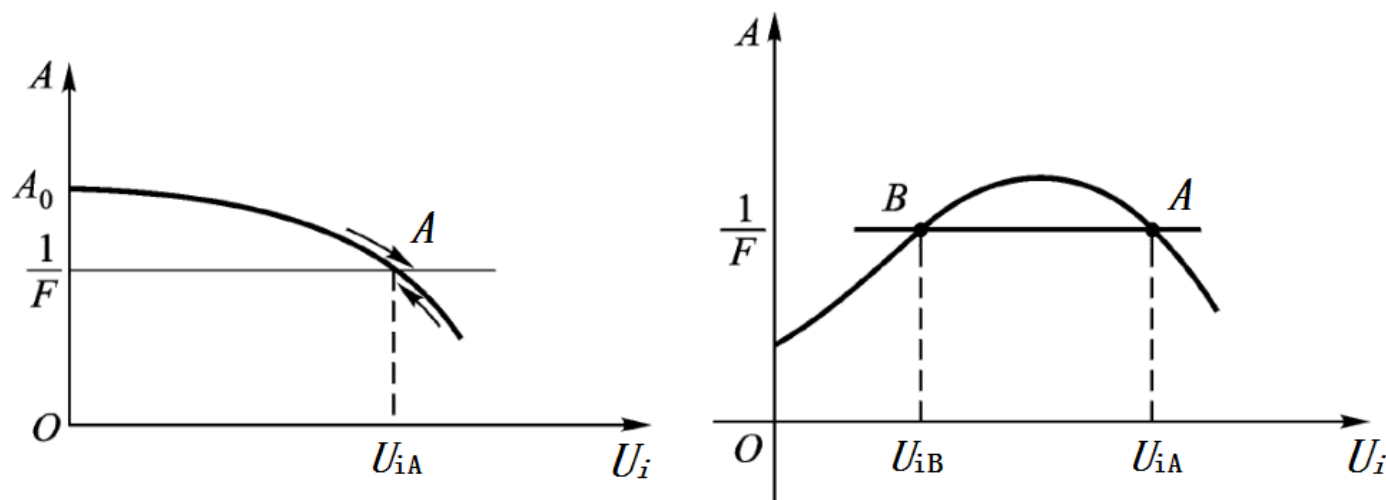
1. 振幅稳定条件

$$\left. \frac{\partial T}{\partial U_i} \right|_{U_i=U_{iA}} < 0$$

线性反馈网络
 F 为常数

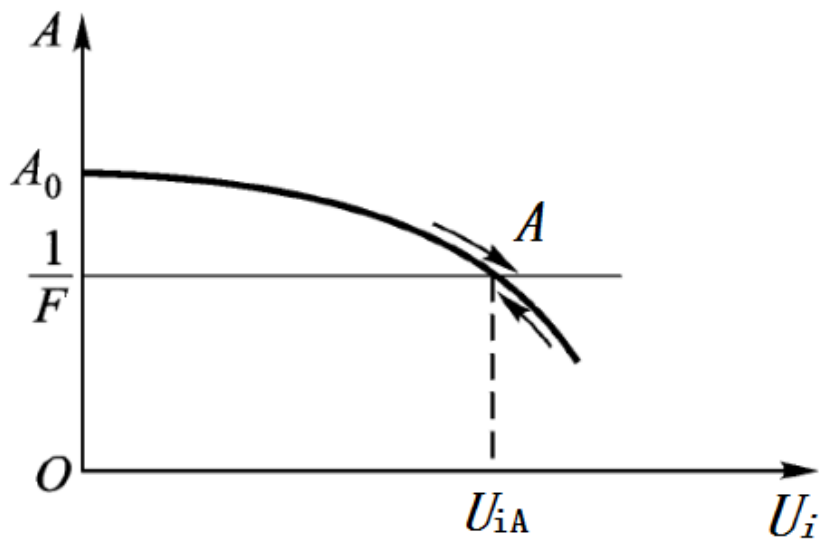
$$\left. \frac{\partial A}{\partial U_i} \right|_{U_i=U_{iA}} < 0$$

要保证外界因素变化时振幅相对稳定，就是要：当振幅变化时， AF 的大小朝反方向变化。



1. 振幅稳定条件

在外因的作用下，振荡器在平衡点附近可重新建立新的平衡状态，外因消失之后又能自动的恢复到原来的平衡状态。



在A点附近（平衡点）：

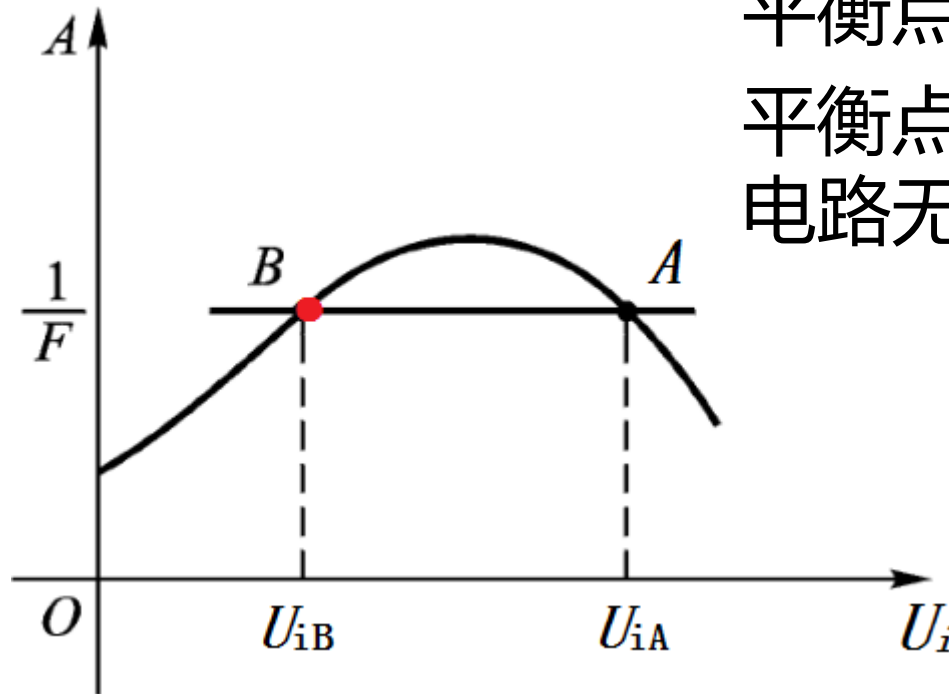
$$U_i \uparrow \rightarrow A \downarrow, AF < 1 \rightarrow U_i \downarrow$$

$$U_i \downarrow \rightarrow A \uparrow, AF > 1 \rightarrow U_i \uparrow$$

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

特点（关键）：A随着 U_i 的变化率为负值。

1. 振幅稳定条件



平衡点B不是稳定的平衡点。
平衡点A是稳定的平衡点，但
电路无法自己到达A点

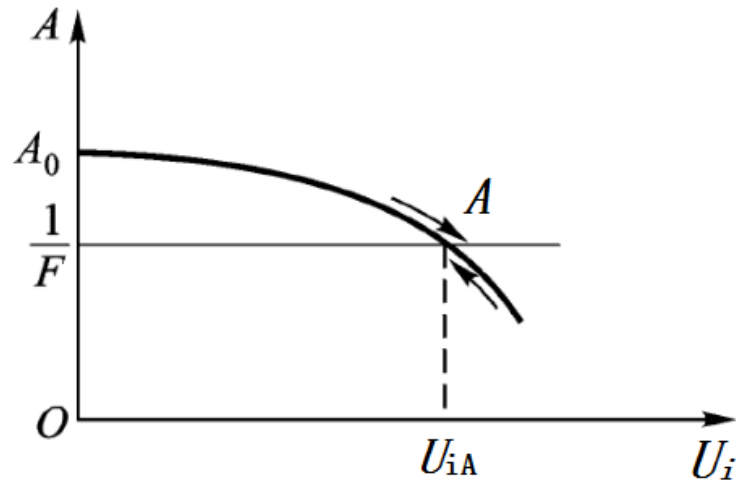
$$\left. \frac{\partial A}{\partial U_i} \right|_{U_i=U_{iB}} > 0$$

在B点附近（平衡点）：

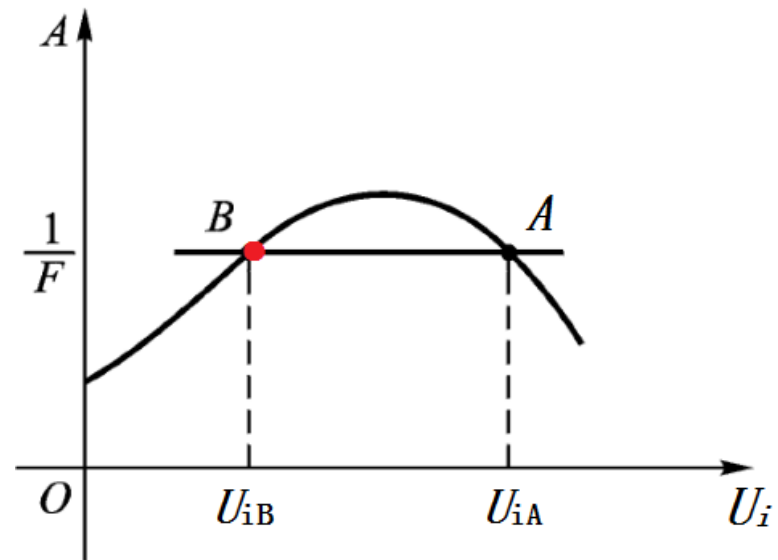
$U_i \uparrow \rightarrow A \uparrow, AF > 1 \rightarrow$ 停在A点

$U_i \downarrow \rightarrow A \downarrow, AF < 1 \rightarrow U_i \downarrow \rightarrow$ 停振

1. 振幅稳定条件



软自激的振荡特性



硬自激的振荡特性

软自激：无需外加激励，振荡便可自激。开始起振时， $AF > 1$ ，振荡处于增幅振荡状态，振幅由小到大，直到达到A点为止。

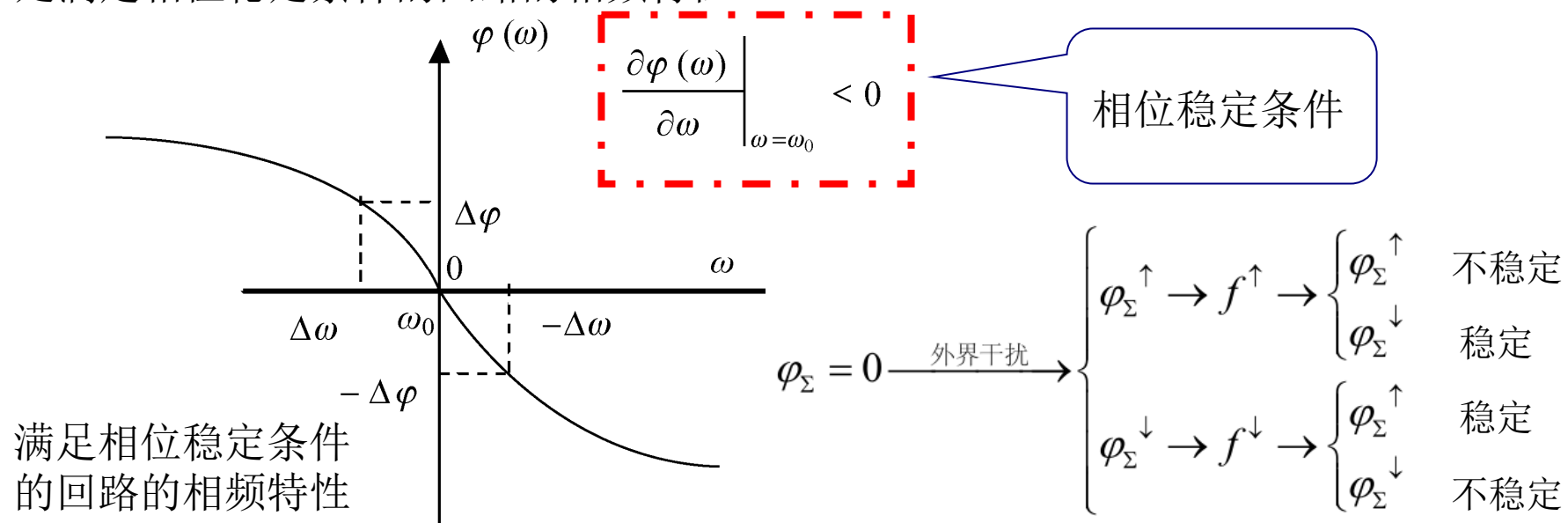
硬自激：需要预先加上一个一定幅度的信号才能起振。

2. 相位稳定条件

相位平衡的稳定条件是指相位平衡遭到破坏时，电路本身能够建立起相位平衡的条件。由于正弦信号的角频率 ω 与相位 ϕ 的关系为

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} \quad \phi = \int \omega dt$$

此相位的变化会引起角频率的变化，角频率的变化也会引起相位的变化。下所示是满足相位稳定条件的回路的相频特性。

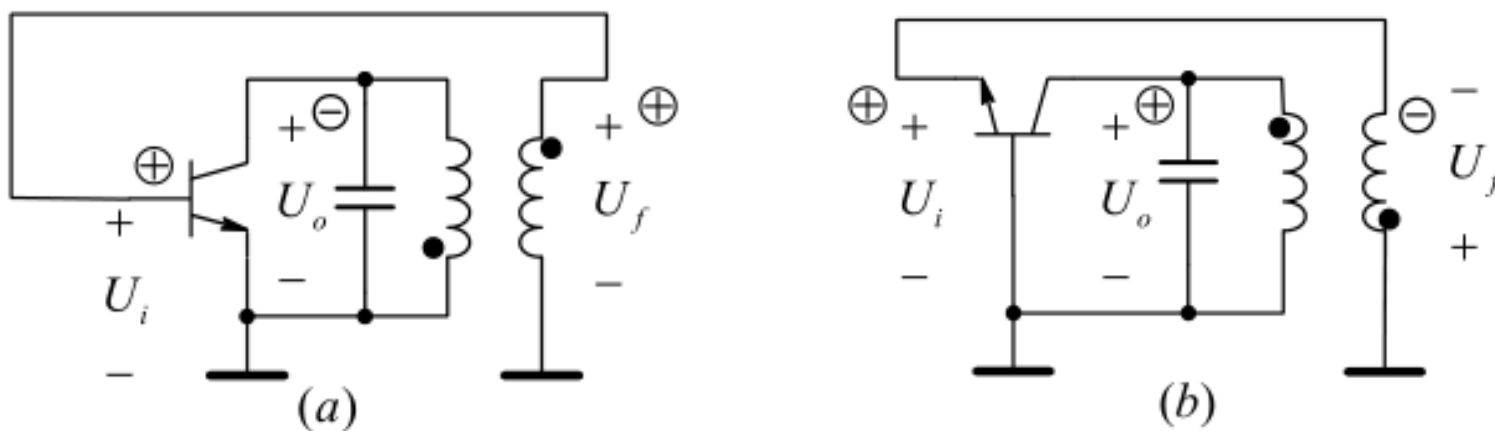


正弦波振荡电路的组成要点

- ▶ 放大电路（有无放大能力。静态工作点是否合适。）
- ▶ 正反馈网络
- ▶ 选频网络（确定振荡频率。通常与反馈网络合二为一。）
- ▶ 稳幅环节 从 $AF > 1$ 回到 $AF = 1$
- ▶ 稳定环节 { 幅度稳定
 相位稳定

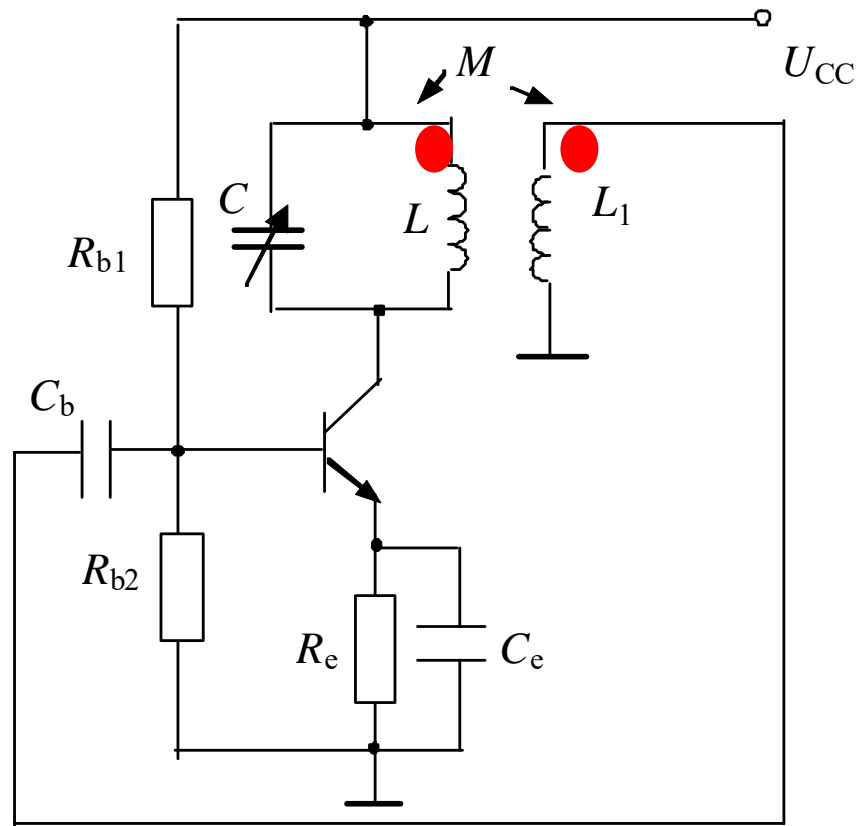


例：判断以下电路是否满足相位平衡条件



高频电子线路

例：下图所示为一LC振荡器的实际电路，图中反馈网络是由电感 L 和 L_1 之间的互感 M 来实现，称之为LC互感耦合振荡器，其中电容 C_b 为耦合电容，电容 C_e 为高频旁路电容。分析该电路满足正反馈时其同名端的位置。



振荡器的频率和幅度稳定度

频率稳定度的定义：尽管振荡器在满足平衡状态的稳定条件下，当受到外界不稳定因素的影响时能够自动回到平衡状态，但振荡频率在平衡点附近随机变化却是不可避免的。频率稳定度就是衡量实际振荡频率偏离于标称振荡频率的一个程度，是振荡器的一个很重要的性能指标。

频率稳定度在数量上通常用频率偏差来表示。频率偏差是指振荡器的实际频率和标称频率之间的偏差。它可分为绝对偏差和相对偏差。设 f_0 是标称频率， f 是实际工作频率：

绝对频率偏差为：

$$\Delta f = |f - f_0|$$

相对频率偏差（频率准确度）为：

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{|f - f_0|}{f_0}$$



振荡器的频率和幅度稳定度

频率稳定度：指在一定时间间隔内，频率准确度的变化。

$$\text{频率稳定度} = \left. \frac{\Delta f}{f_0} \right|_{\Delta t}$$

根据所指定的时间间隔不同，频率稳定度可分为长期频率稳定度、短期频率稳定度和瞬间频率稳定度三种。

长期稳定度：一般指几天或几个月(与电路元件和石英晶体等老化有关)

短期稳定度：指一天内, 以小时, 分, 秒计(与温度变化、电压变化和电路参数不稳有关)

瞬时稳定度：一般以秒或毫秒计(主要由内部噪声引起)



振荡器的频率和幅度稳定度

影响振荡频率稳定度的有如下三种因素：

1) 振荡回路参数 L 与 C ; 2) 回路电阻 r ; 3) 有源器件的参数。

影响稳定度的因素及解决办法：

1. 元件的机械变形（温度、气压、湿度等）

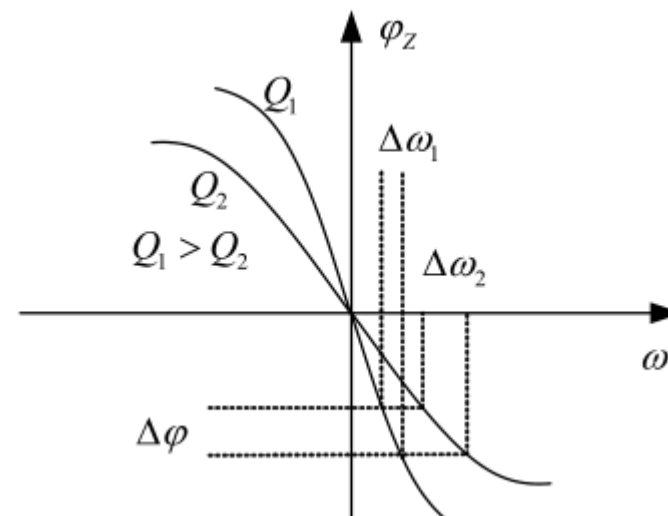
- 1) 选用不易发生机械变形的元件;
- 2) 振荡器置于恒温箱中;
- 3) 采用温度补偿措施。

2. 回路电阻 r 的影响

$$Q = \frac{\omega L}{r}, \quad r \uparrow \rightarrow Q_L \downarrow \rightarrow \text{稳定度} \downarrow, \quad r \downarrow \rightarrow Q_L \uparrow \rightarrow \text{稳定度} \uparrow$$

3. 有源器件参数变化的影响：

有源器件工作状态的改变也会对频率产生影响。



振荡器的频率和幅度稳定度

幅度稳定度：在规定的条件下，输出信号幅度的相对变化量。
振荡器输出电压标称值为 U_0 ，实际输出电压与标称值之差为 ΔU ，
则振幅稳定度为 $\Delta U/U_0$ 。

$$\frac{\Delta U}{U_o} = \frac{|U - U_o|}{U_o}$$

实现稳定方法：

内稳幅：利用放大器工作于非线性区来实现的方法，与晶体管的静态初始工作状态、自给偏压效应以及起振时AF的大小有关。静态时工作电流越小，起振时AF越大，自给偏压效应越灵敏，稳幅效果越好，但波形失真也会越大。

外稳幅：使放大器工作在线性工作状态，而另外接入非线性电路进行稳幅。



LC振荡器

LC谐振回路作为选频网络的反馈式振荡器

- 其工作频率主要由LC回路决定

互感耦合振荡器

电感反馈式三端振荡器

电容反馈式三端振荡器



互感耦合振荡器

放大器与振荡器本质上都是将直流电能转化为交流电能，不同之处在于：放大器需要外加输入信号而振荡器不需要。因此，如果将放大器的输出正反馈回输入端，以提供控制能量转换的信号，就可能形成振荡器。

如果由**LC**谐振回路通过互感耦合将输出信号送回输入回路，所形成的是互感耦合振荡器。

由互感耦合同名端定义可判知，反馈网络形成正反馈，满足相位平衡条件。如果再满足起振条件，就能够构成正常工作的振荡器。



互感耦合振荡器

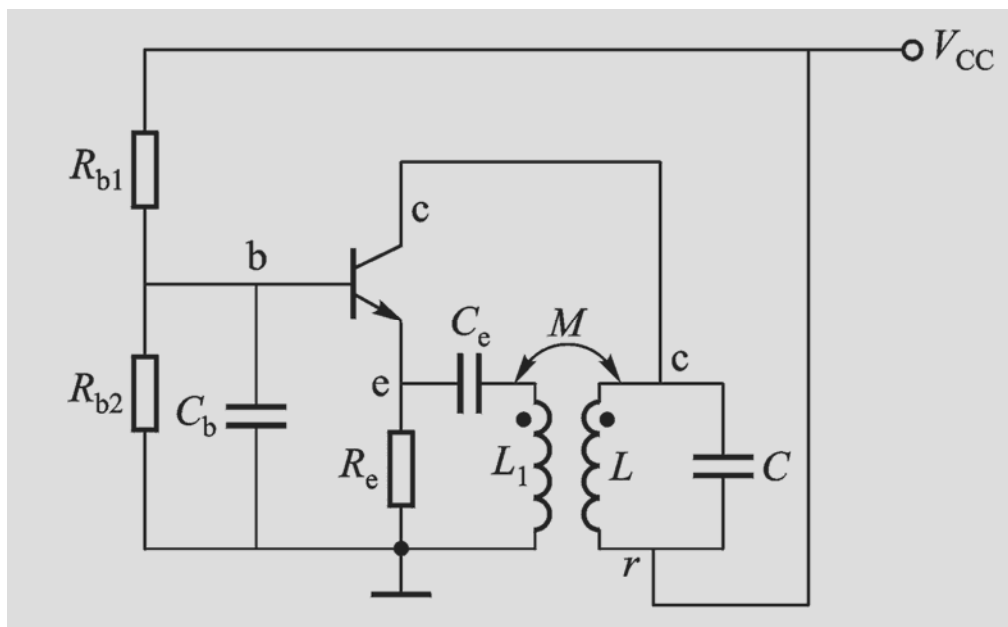
根据振荡器回路在集电极、基极、发射极来区分的互感耦合振荡器有三种：

- 调集电路
- 调基电路
- 调发电路



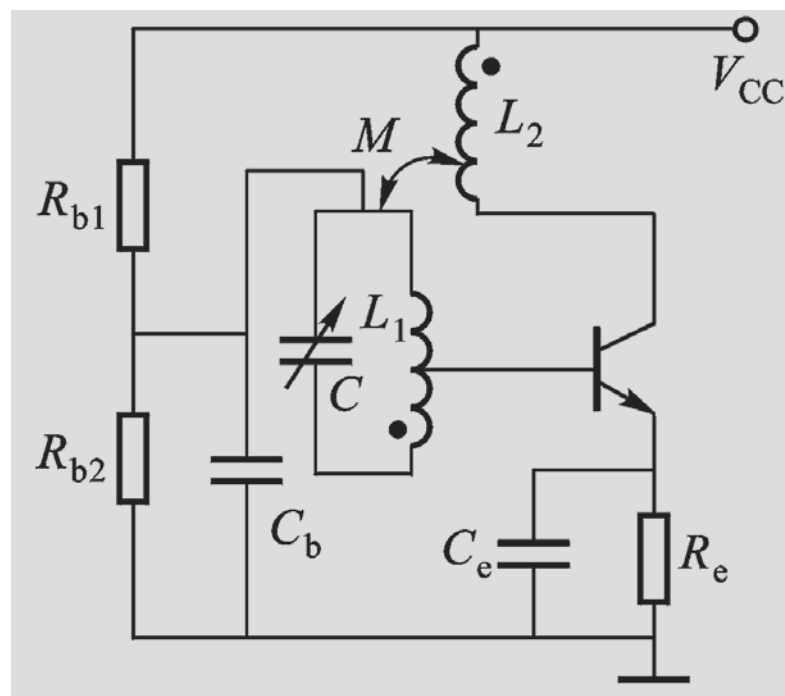
互感耦合振荡器

调集电路



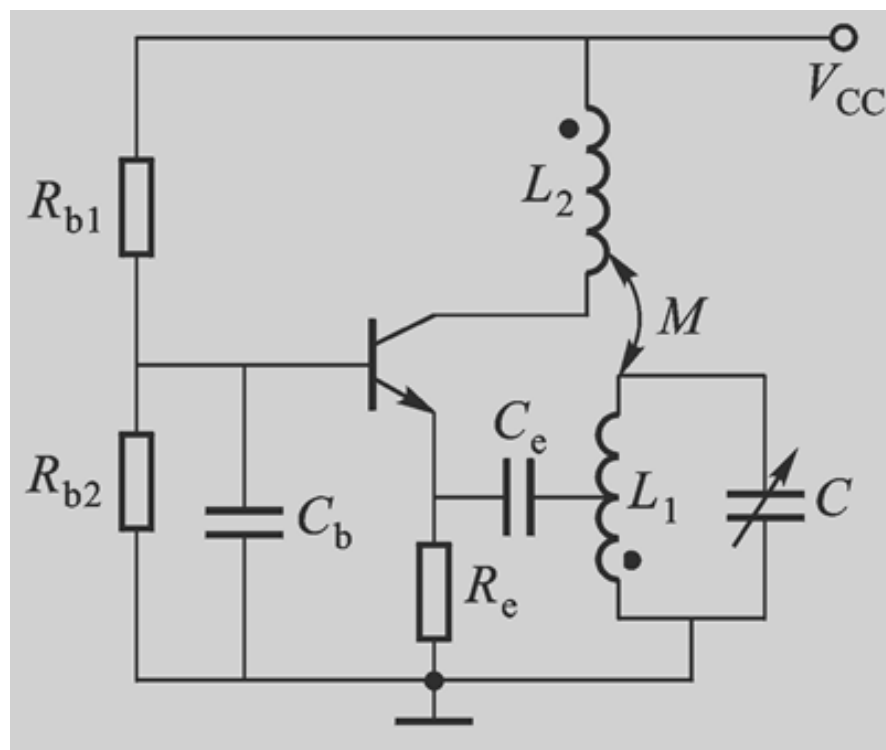
互感耦合振荡器

调基电路



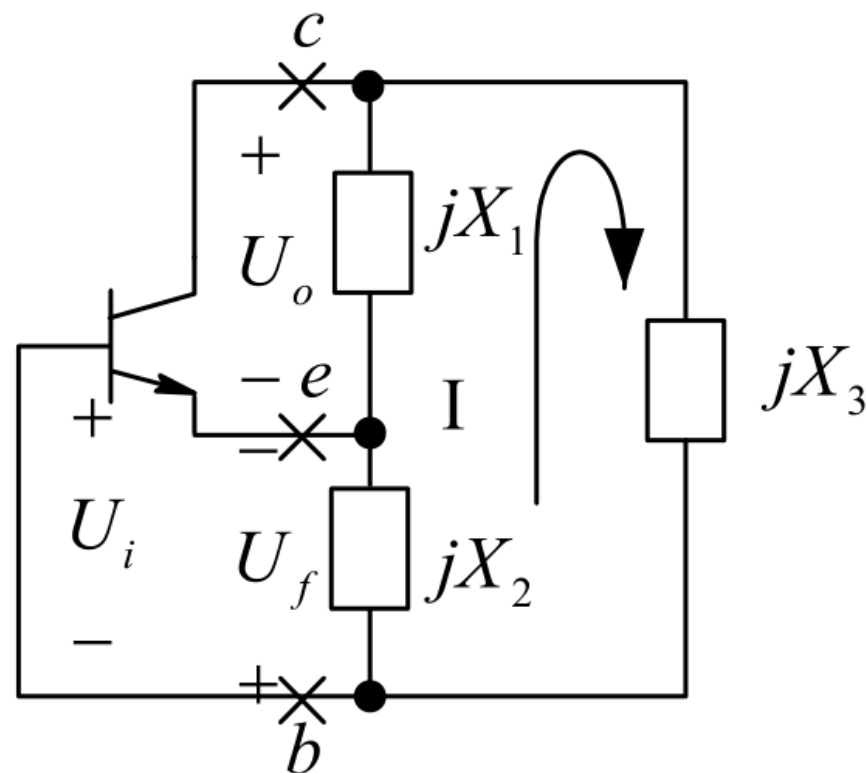
互感耦合振荡器

调发电路



三端振荡器

三端式振荡器是指LC回路的三个电抗元件与晶体管的三个电极组成的一种振荡器，使谐振回路既是晶体管的集电极负载，又是正反馈选频网络，其工作频率可达到几百兆赫兹，在实际中得到了广泛的应用。



三端振荡器

1. 回路谐振时电抗为零

即: $X_1 + X_2 + X_3 = 0$

2. 满足正反馈:

\dot{U}_o 与 \dot{U}_i 反向, \dot{U}_f 与 \dot{U}_i 同向, 所以 \dot{U}_f 与 \dot{U}_o 反向

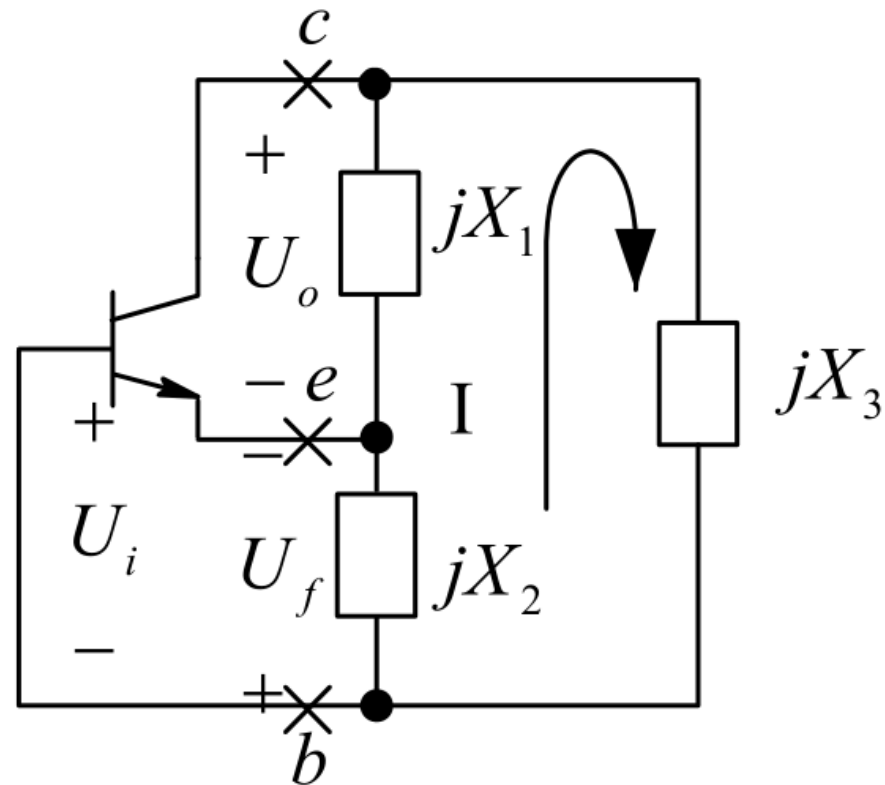
3. 谐振时回路电流远大于晶体管基级、
发射级、集电极电流

$\dot{U}_f = j\dot{I}X_2$ \dot{U}_f 与 \dot{U}_o 反向
 $\dot{U}_o = -j\dot{I}X_1$ $\xrightarrow{\text{X}_1 \text{和} X_2 \text{同类且与} X_3 \text{不同}}$

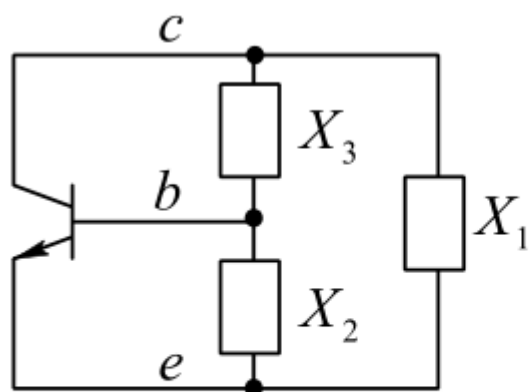
三点式的一般组成原则:

- ▶ 与发射极相连的 X_1 与 X_2 电抗性质相同
- ▶ 不与发射极相连的 X_3 与 X_1 (或 X_2) 电抗性质相反

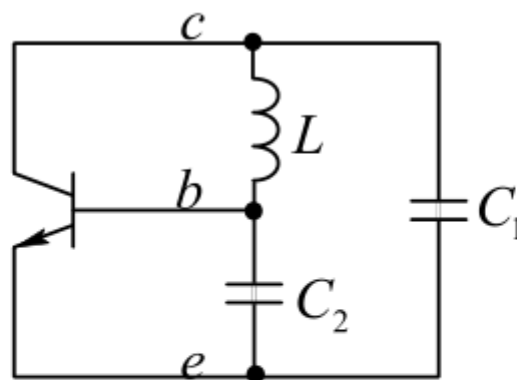
射同基反



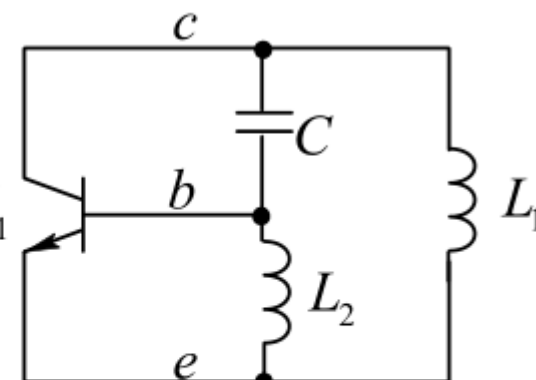
三端振荡器



(a)基本结构



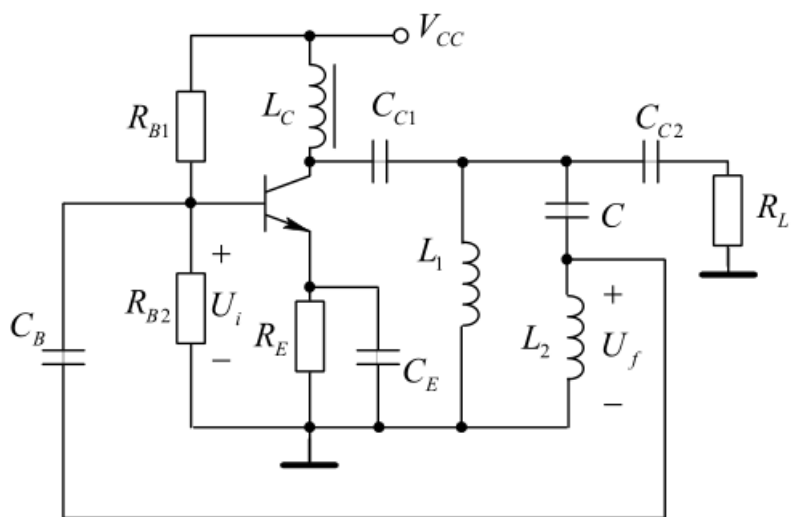
(b)电容三点式



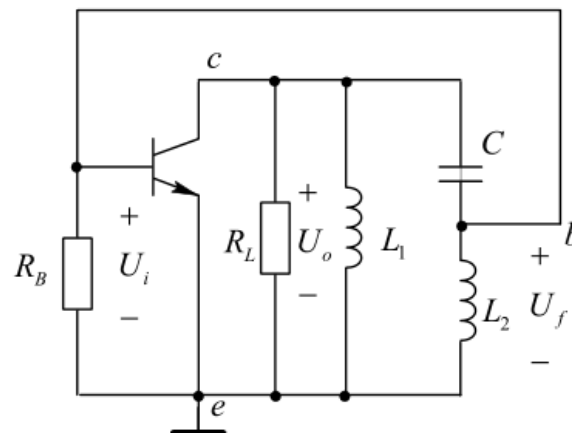
(c)电感三点式

发射极相连的 X_1 与 X_2 电抗原件为电容还是电感

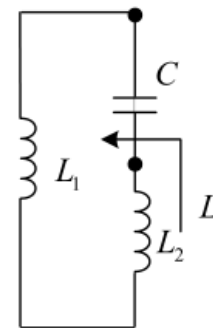
电感式三端振荡器



(a) 电路



(b) 交流通路



(c) 选频回路

电感式三端振荡器 哈特莱电路

①交流通路的基本形式:

三极管三个电极分别与电感三个引出端相连，反馈电压取自 L_2 上。

②振荡频率: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

其中: $L = L_1 + L_2 + 2M$

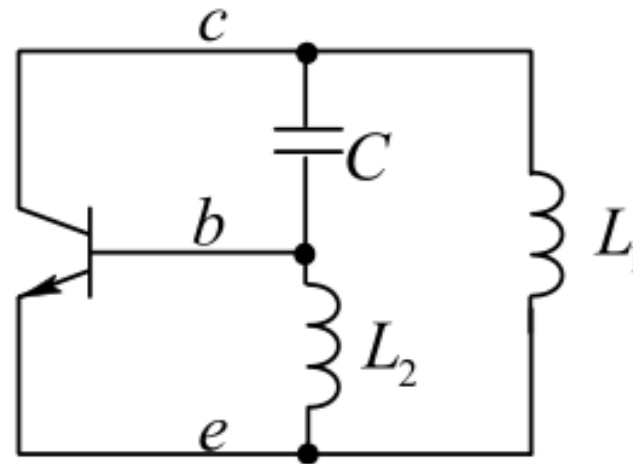
③反馈系数:

$$F = (L_2 + M) / (L_1 + M)$$

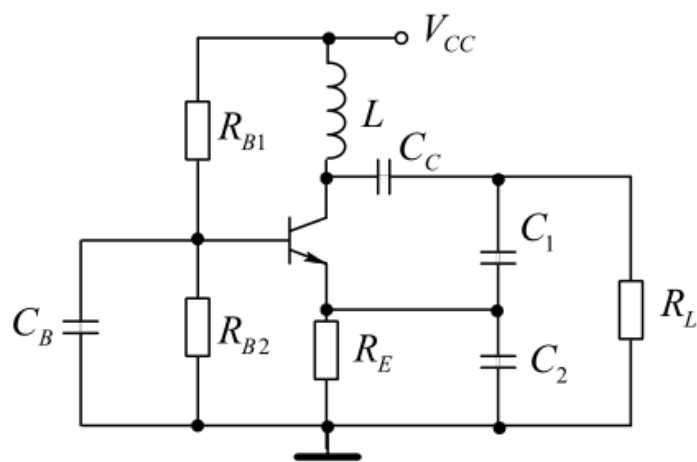
④电路特点:

优点: 通过改变电容来调节频率基本不影响反馈系数。

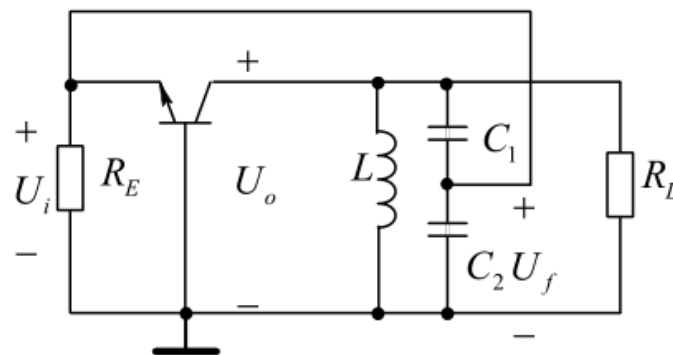
缺点: 采用电感反馈，电感对高次谐波呈现高阻抗，谐波成份多，输出波形差。



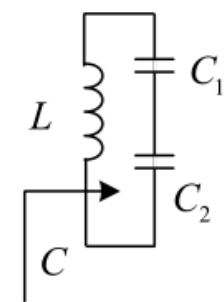
电容式三端振荡器



(a) 电路



(b) 交流通路



(c) 选频回路

电容式三端振荡器 考毕兹电路

①交流通路的基本形式

三极管三极分别与电容的三个引出端相连，反馈电压取自 C_2 上。

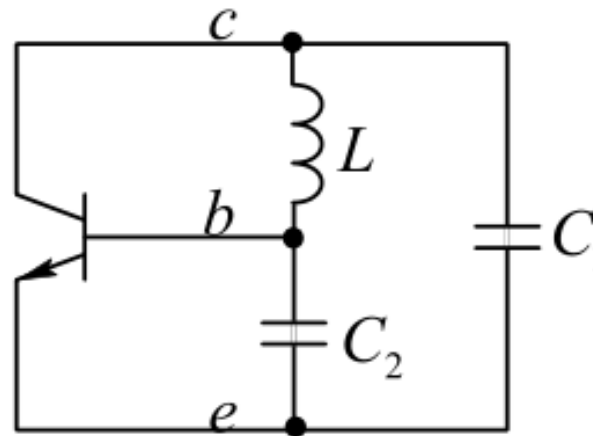
②振荡频率：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

③反馈系数： $F = C_1 / (C_1 + C_2)$

④电路特点：

- 优点：高次谐波成份小，波形好。
- 缺点：调节频率影响反馈系数，受三极管等效输入电容和输出电容影响。



改进电容三端式振荡器

(1) 克拉泼(Clapp)振荡器

① 交流通路的基本形式:

电感 L 支路中串联了小电容 C_3 ，回路电容近似等于 C_3

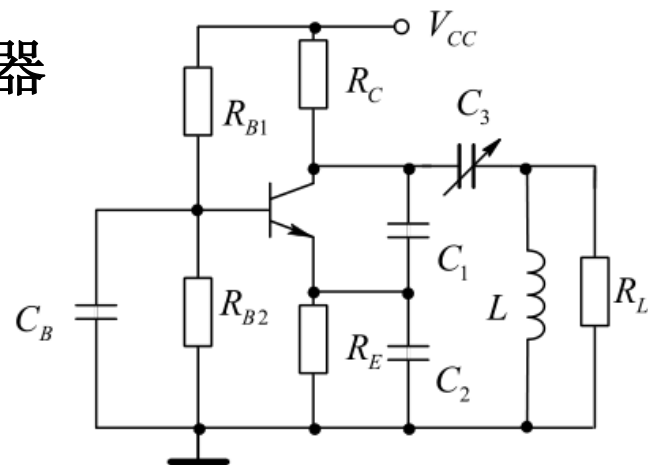
② 振荡频率:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$$

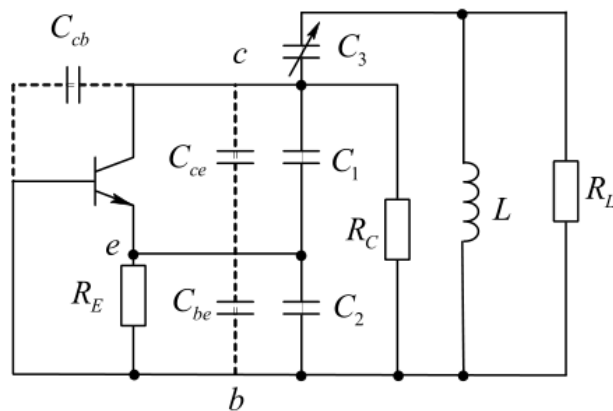
③ 电路特点:

➤ 优点：振荡频率不受晶体管结电容影响。

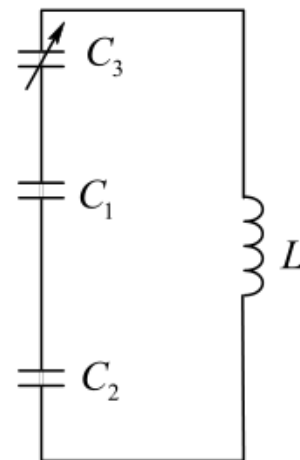
➤ 缺点：调节 C_3 改变频率时影响振幅。高频时接入系数减小，可能停震。



(a) 电路



(b) 交流通路



(c) 选频回路

改进电容三端式振荡器

(2) 西勒(Seiler)振荡器

① 交流通路的基本形式:

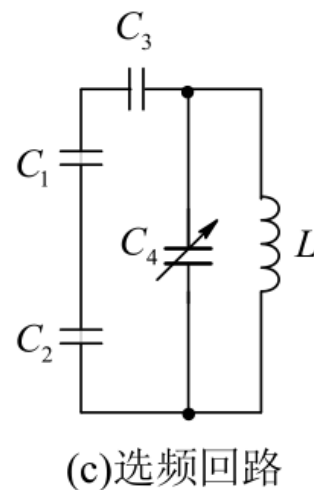
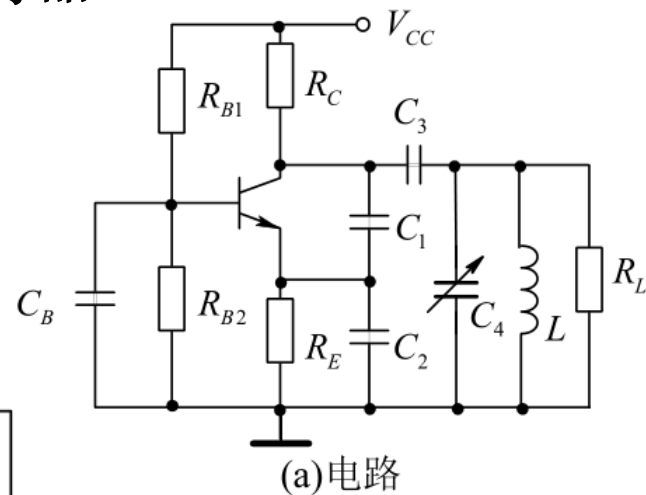
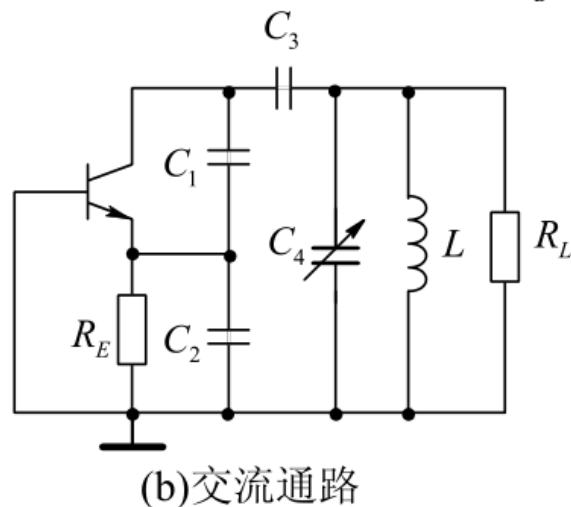
在 L 两端又并联了一
可调电容 C_4 ， C_4 远大于 C_3

② 振荡频率:

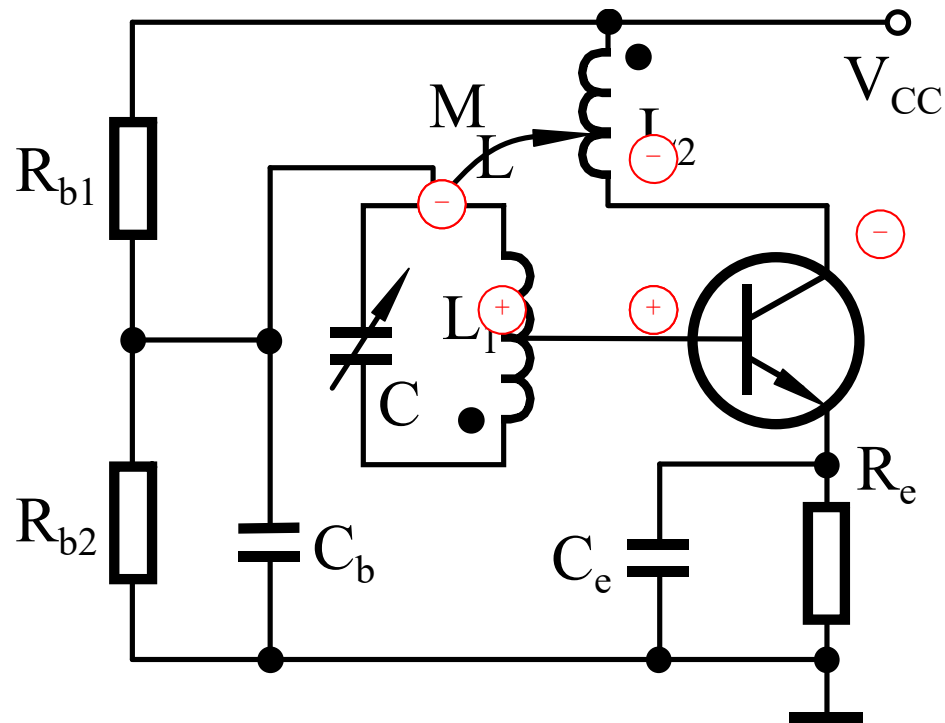
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3 + C_4)}}$$

③ 电路特点:

- 振荡频率和反馈系数独立，
频率基本上仅由 C_4 及 L 决定；
- 调节 C_4 时不影响接入系数，输出幅度稳定。

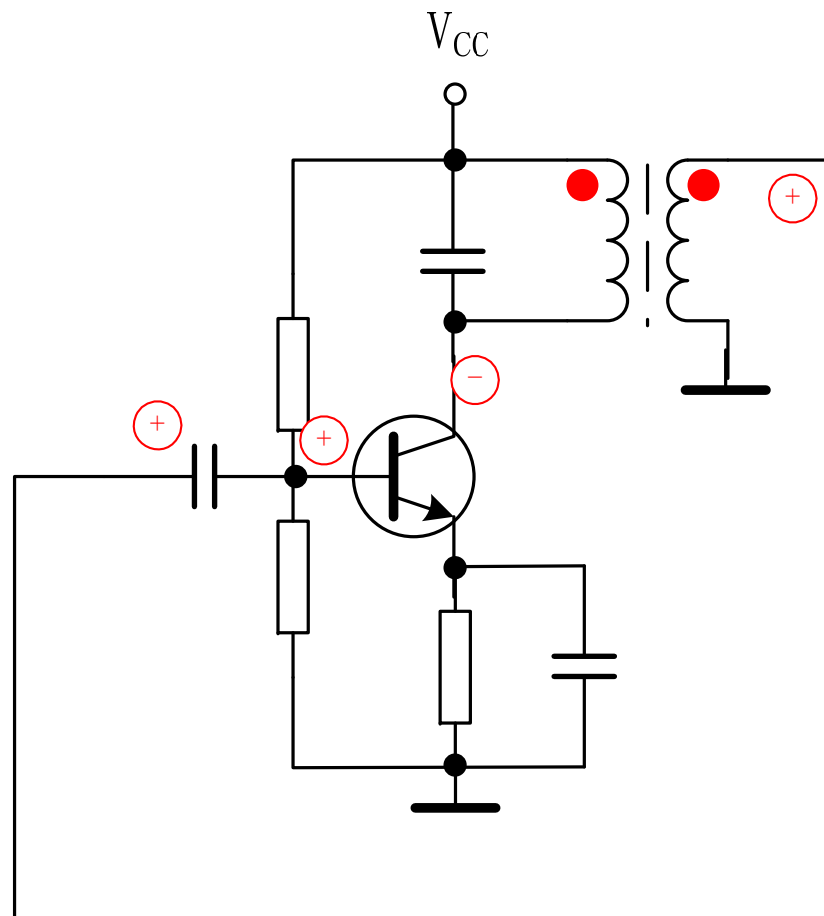


例:判断下列电路能否振荡

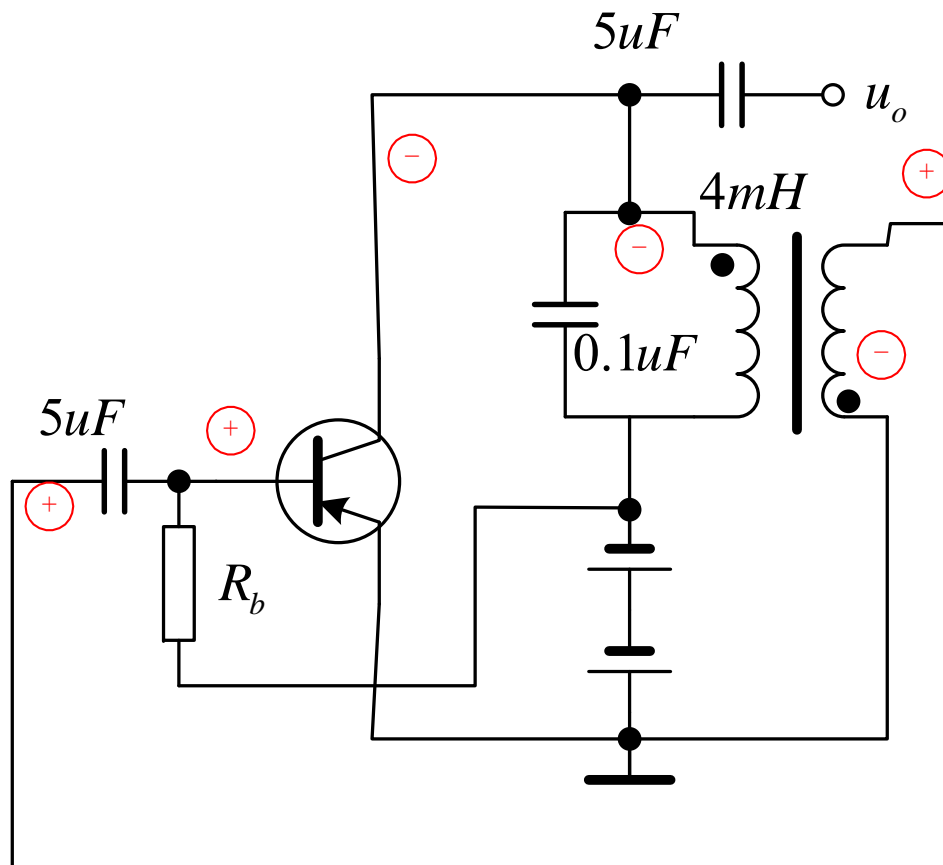


正反馈可能振荡

例:标出同名端使电路能够振荡



例:判断能否振荡,估算振荡频率

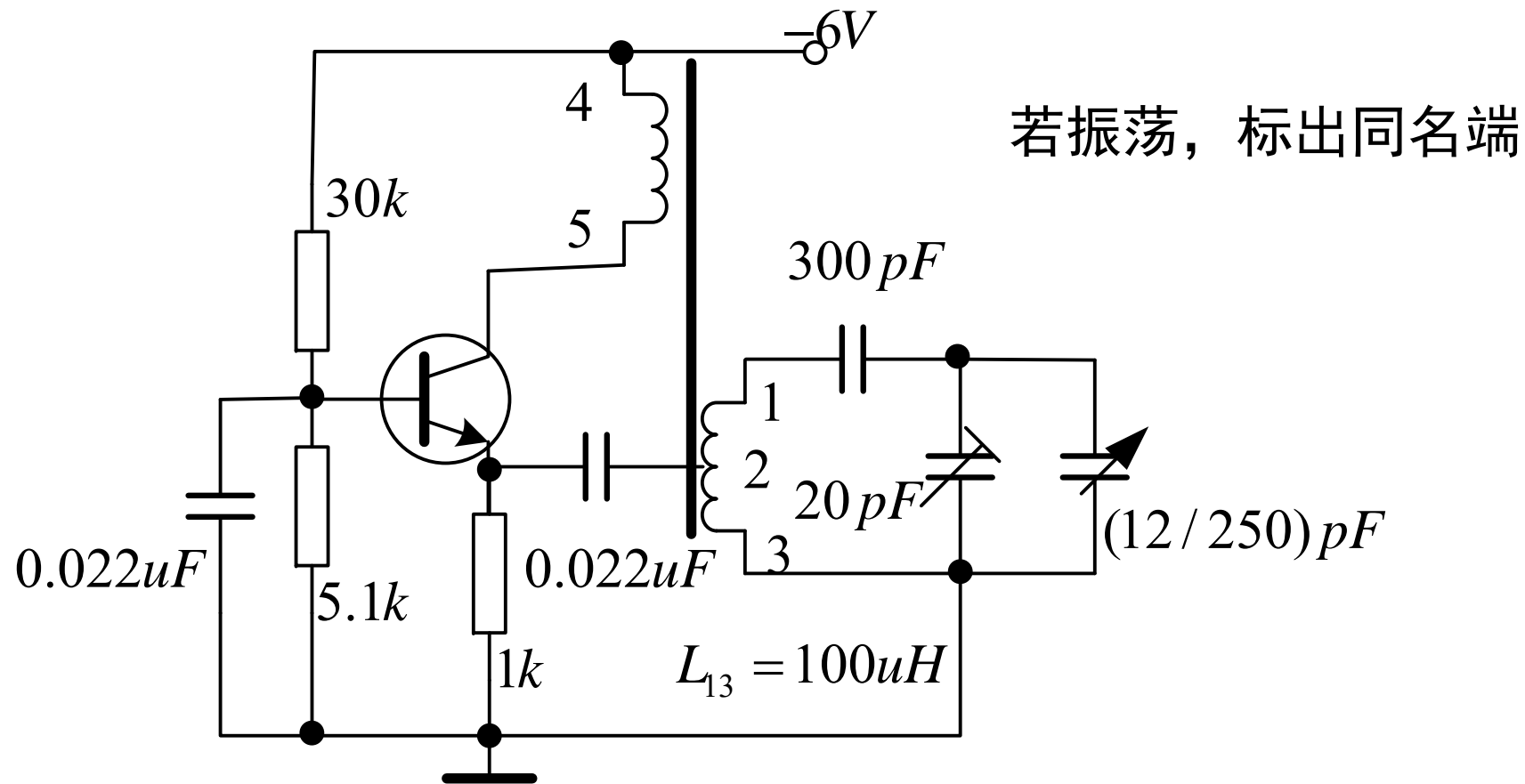


正反馈,可能振荡

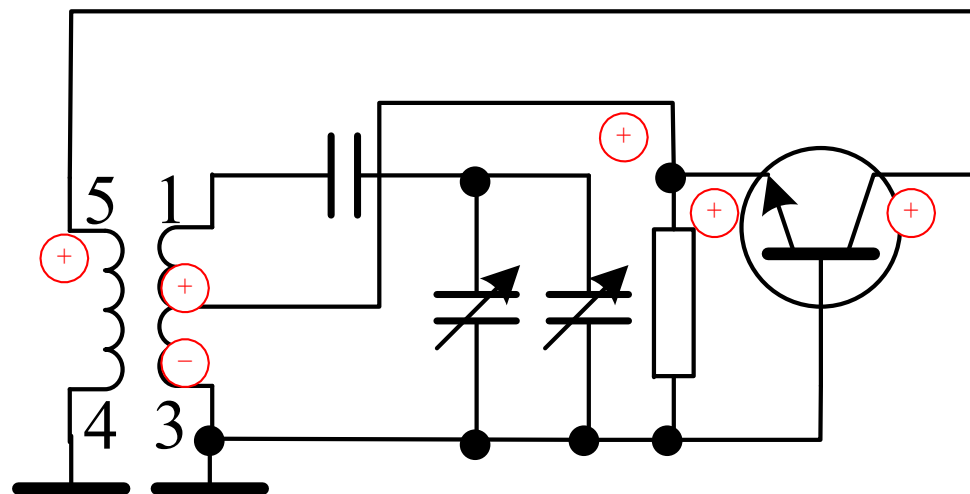
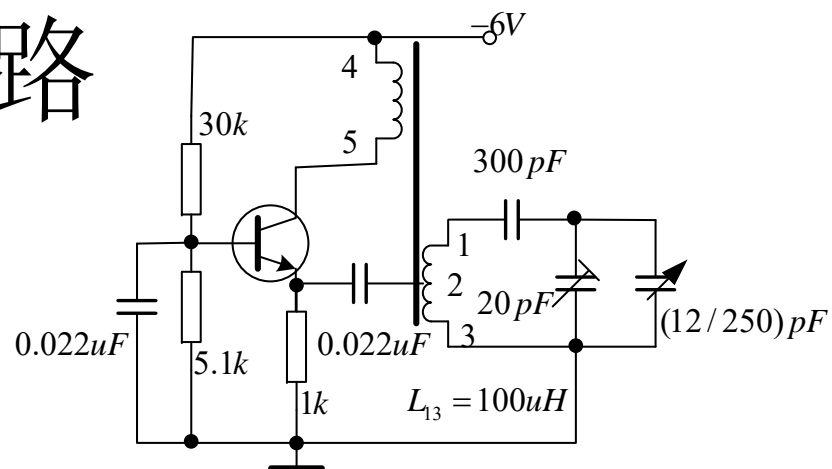
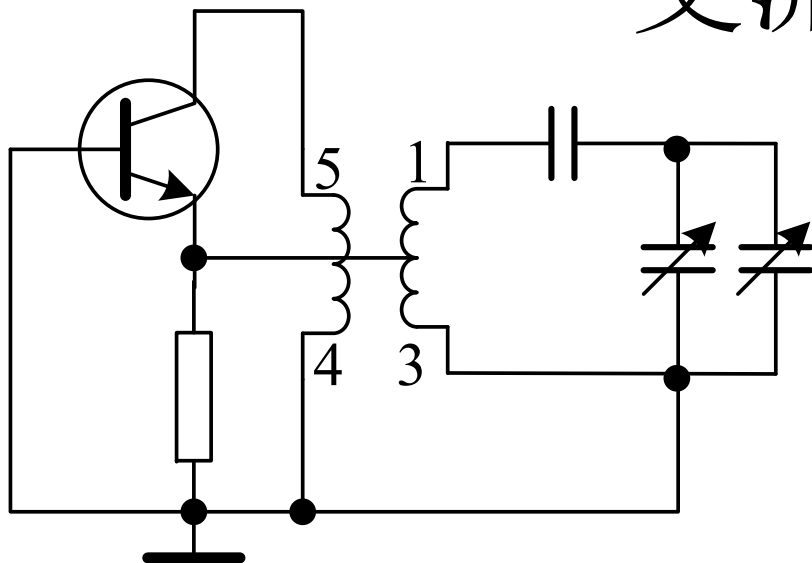
f_0 由LC回路决定

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
$$= \frac{1}{2\pi\sqrt{0.1\mu \times 4\text{m}}} \approx 8\text{kHz}$$

例：超外差收音机的本振电路

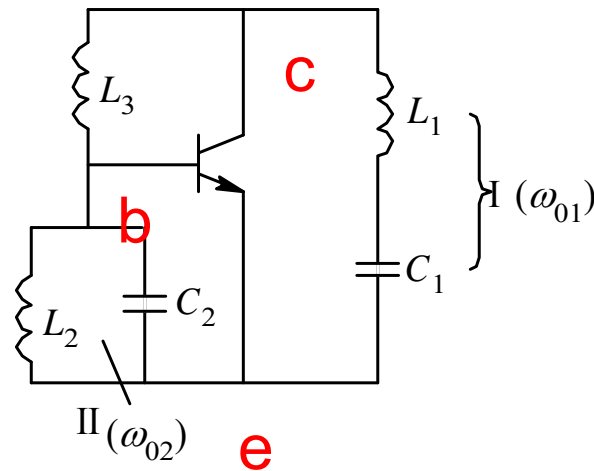


交流通路

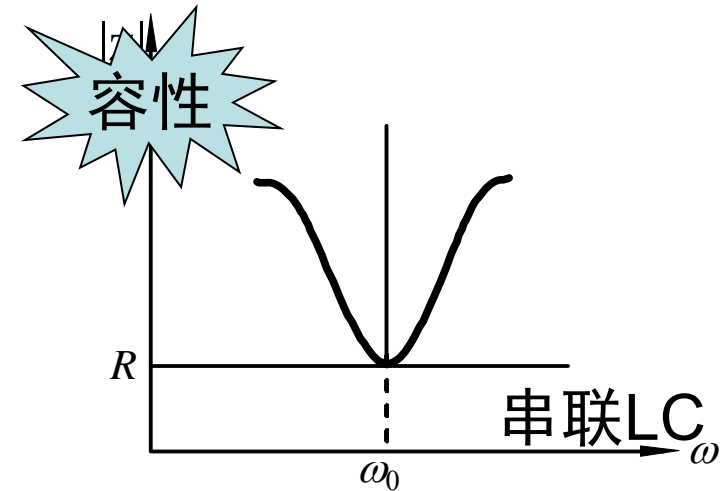


所以：1、5为同名端

例:判断下列电路振荡的条件

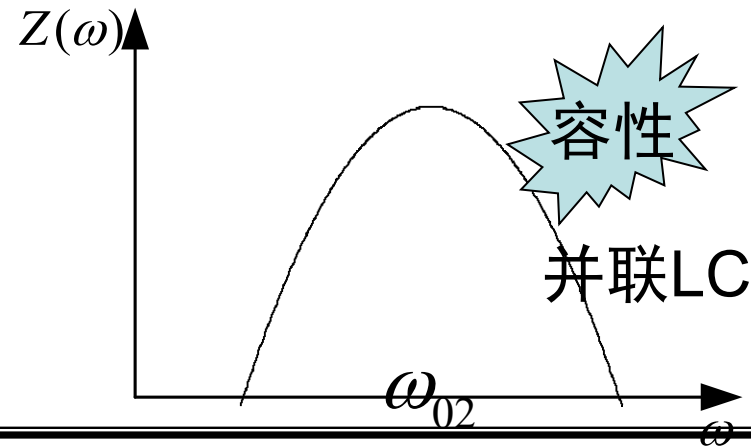


射同基反:
L1C1:容性
L2C2:容性

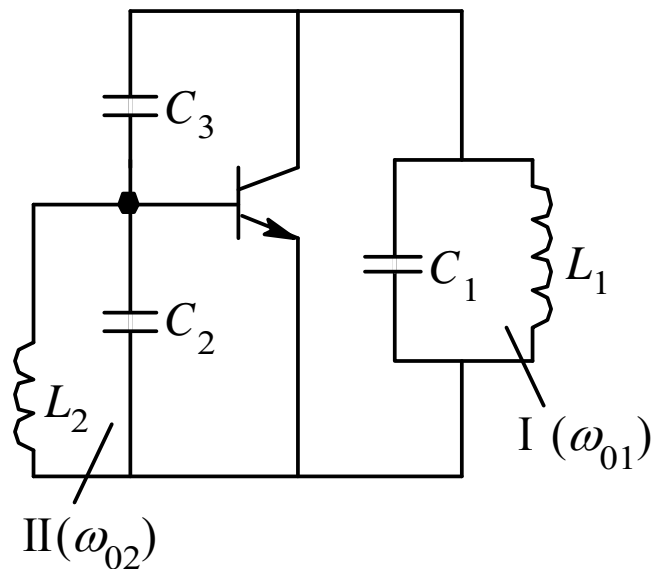


$$\therefore \omega_{02} < \omega_g < \omega_{01}$$

才可能振荡



高频电子线路



基反:

L2C2:感性

射同:

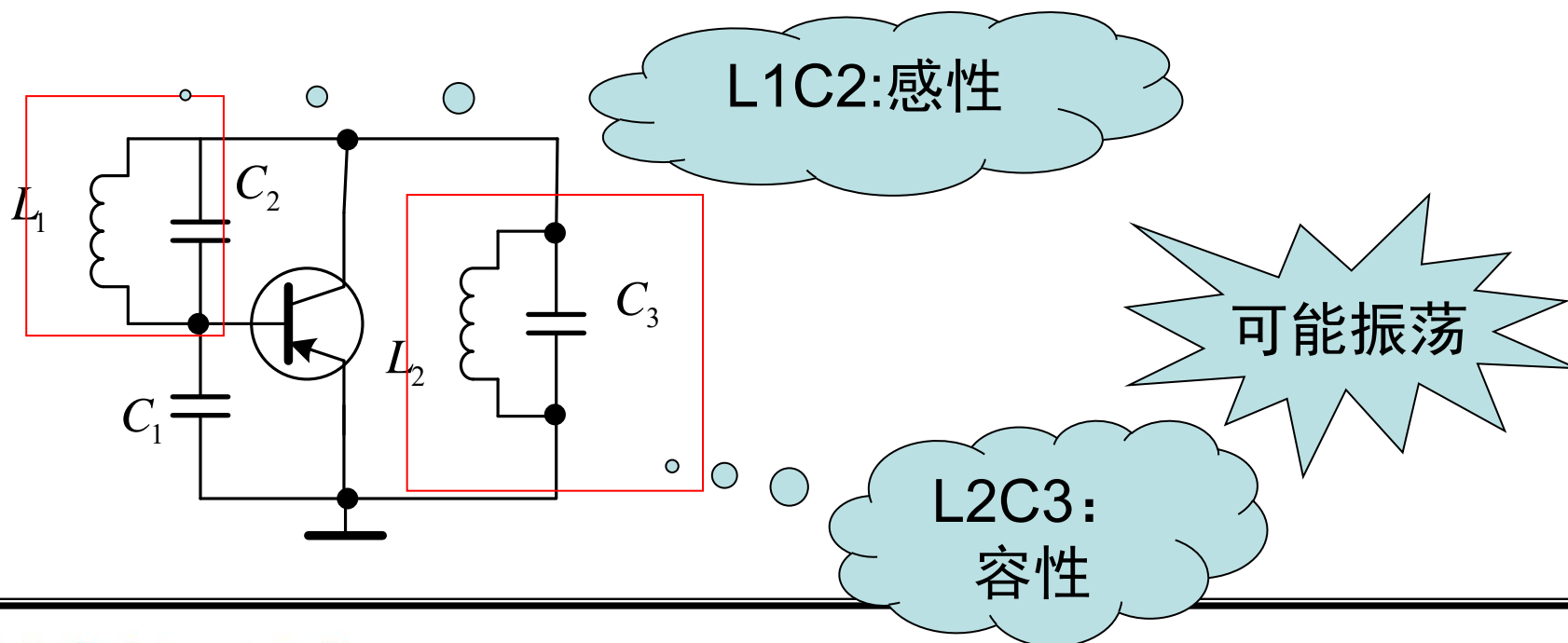
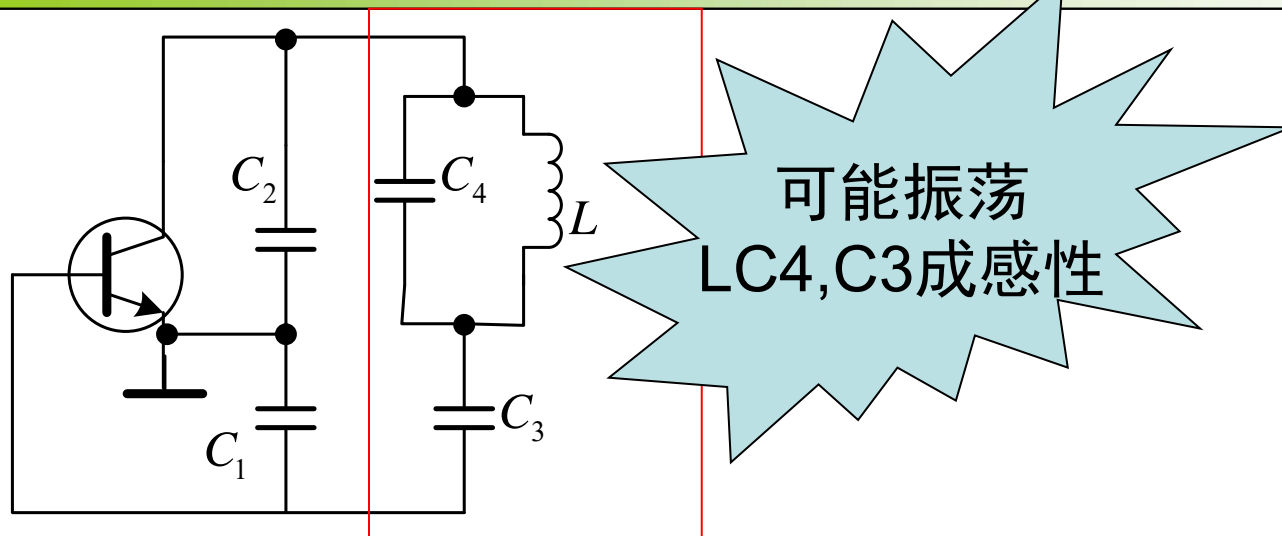
L1C1:感性

$\therefore L1C1(L2C2)$ 同为感性

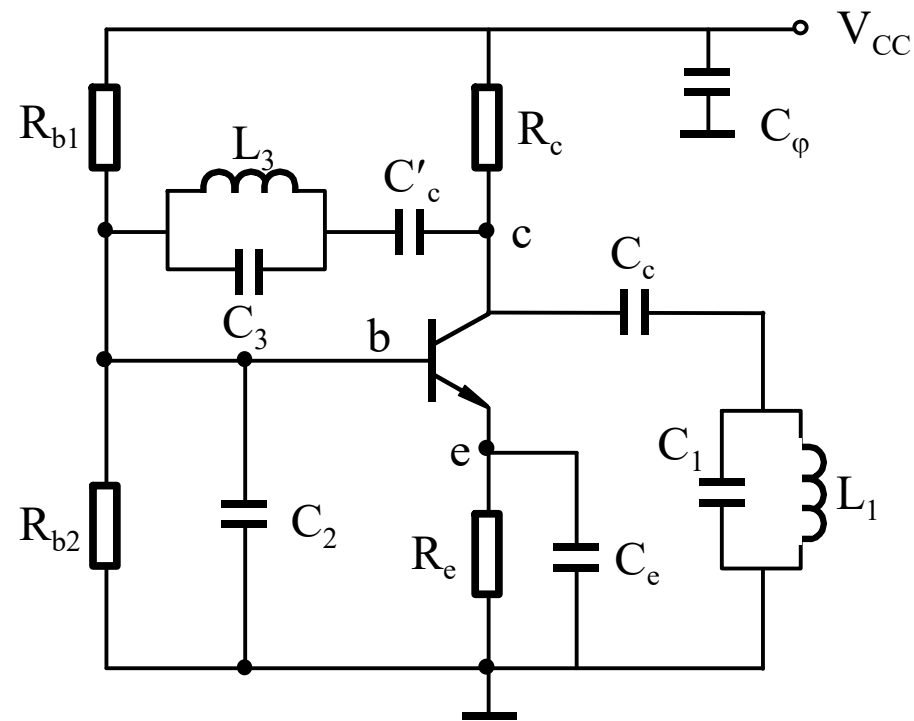
$$\omega_g < \min(\omega_{01}, \omega_{02})$$



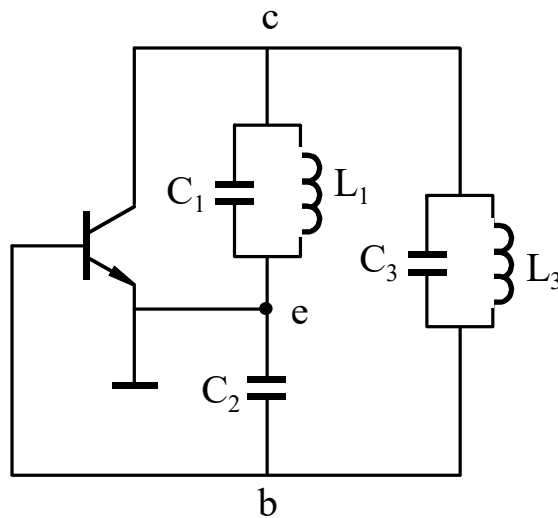
高频电子线路



- 振荡电路如图所示，试画出交流等效电路，并判断电路在什么条件下起振，属于什么形式的振荡电路



高频电子线路



X_{eb} 为容性

X_{ce} 也必须呈容性

X_{cb} 应该呈感性

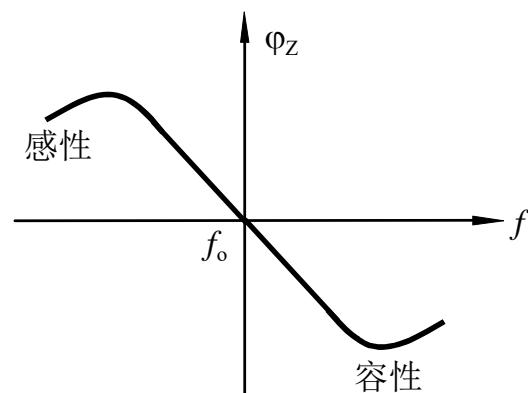
振荡频率 $f_0 > f_1$ (L_1C_1 振荡频率): L_1C_1 呈容性

根据 $X_{be} + X_{ce} + X_{bc} = 0$, L_3C_3 回路应呈感性振荡电路才能正常工作

$f_0 < f_3$ 时可以振荡

等效为电容三端振荡电路

条件为



$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3C_3}}$$

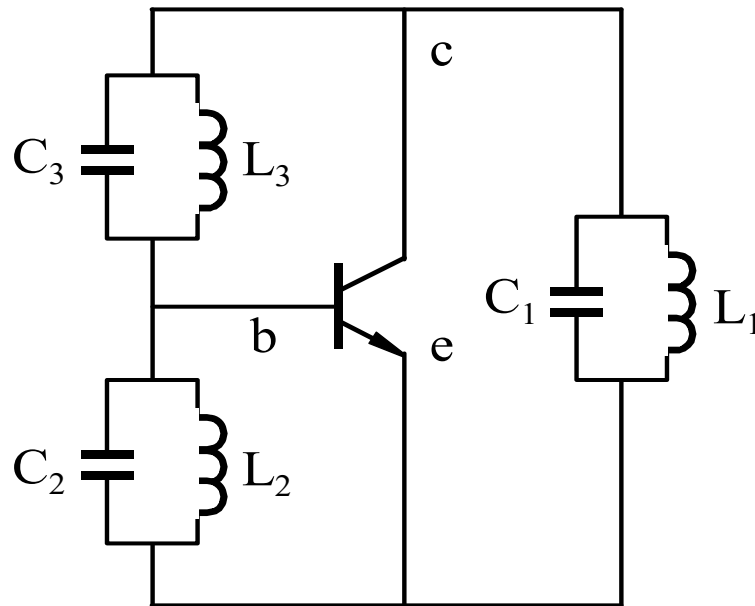
即 $L_1C_1 > L_3C_3$

并联谐振回路的相频特性



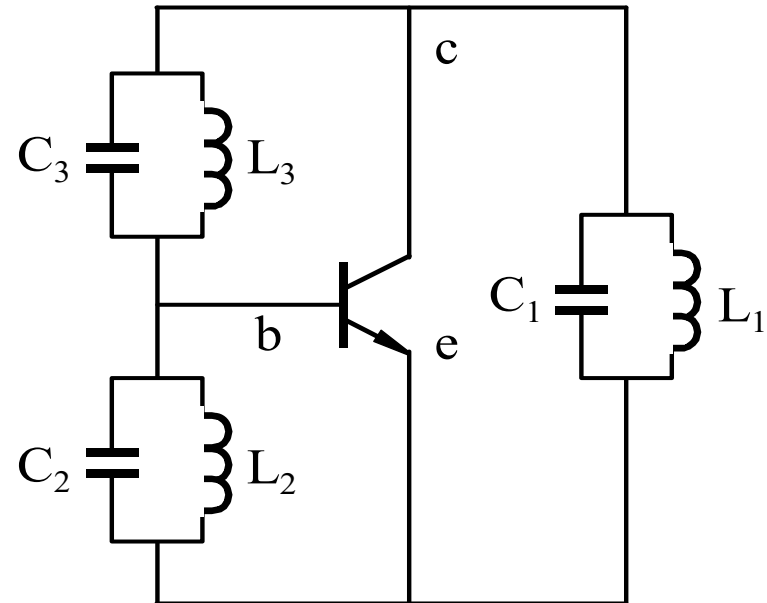
高频电子线路

- 有一振荡器的交流等效电路如图所示。已知回路参数 $L_1C_1 > L_2C_2 > L_3C_3$
- 该电路能否起振？
- 等效为哪种类型的振荡电路？
- 其振荡频率与各回路的固有谐振频率之间有何关系

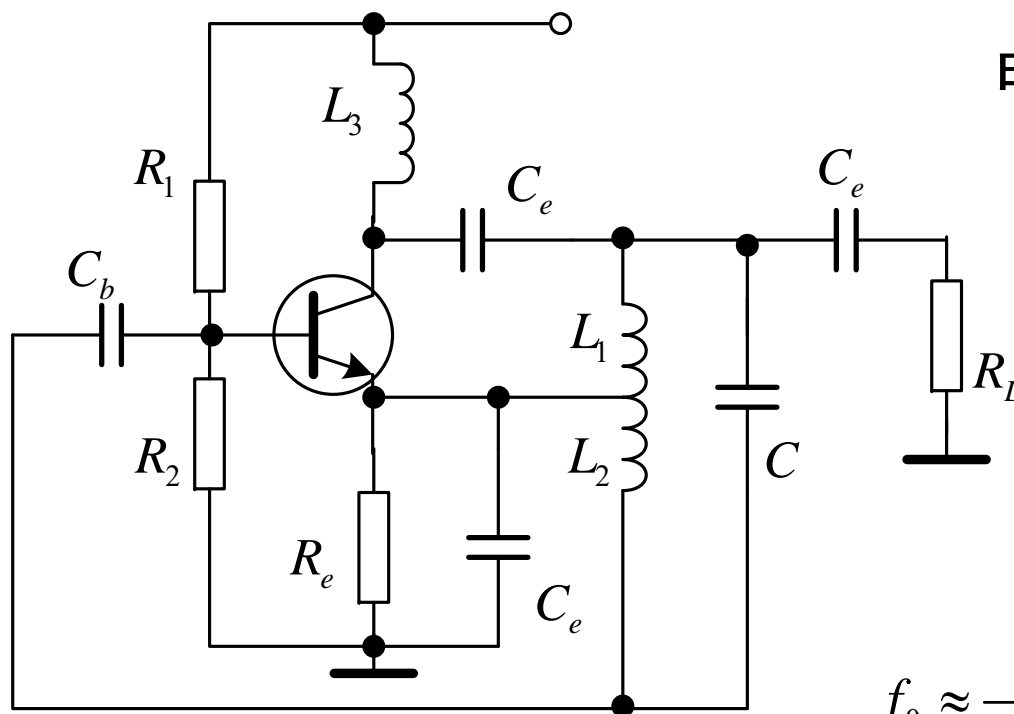


高频电子线路

- 假定 X_{ce} 、 X_{be} 均为电感
 - 则 X_{cb} 应为电容
- 已知条件 $L_1C_1 > L_2C_2 > L_3C_3$
 - 则有 $f_1 < f_2 < f_3$
- 若 X_{ce} 、 X_{be} 为电感
 - 则 $f_0 < f_1$, $f_0 < f_2$, 同时 $f_0 > f_3$
 - f_0 不可能同时大于 f_3 小于 f_2
 - 故不成立
- 若 X_{ce} 、 X_{be} 同为电容
 - 则 $f_0 > f_2 > f_1$, 同时应该 $f_0 < f_3$
 - 有已知条件知振荡频率可满足该条件
 - 即 $f_1 < f_2 < f_0 < f_3$
 - 该电路应为电容三端振荡器。



例：判断下面电路是何种电路，振荡频率为多少？



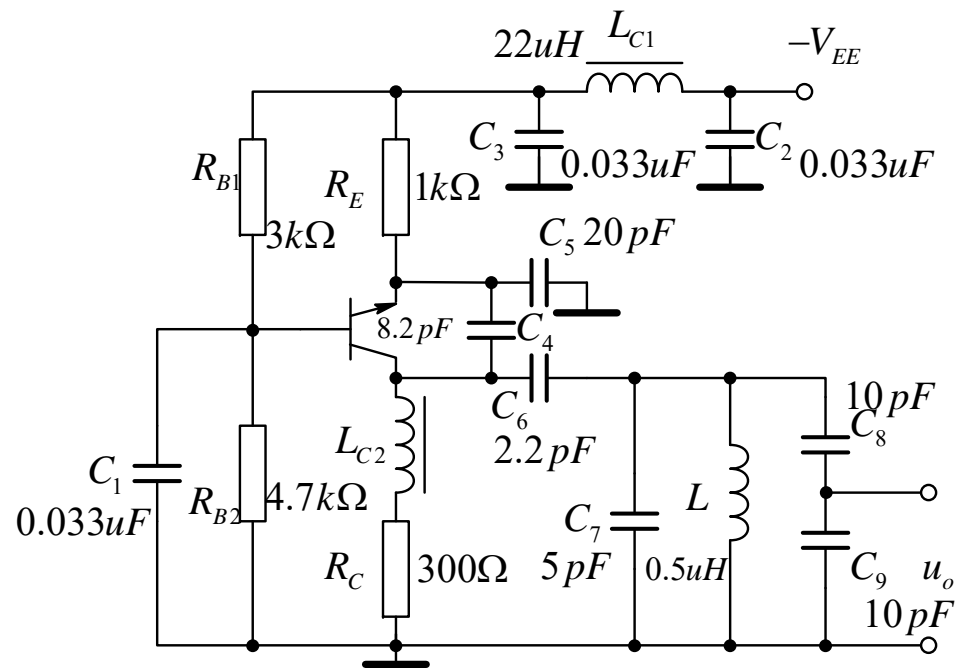
电感三点式（哈特莱）电路

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}} \text{ 不考虑互感}$$

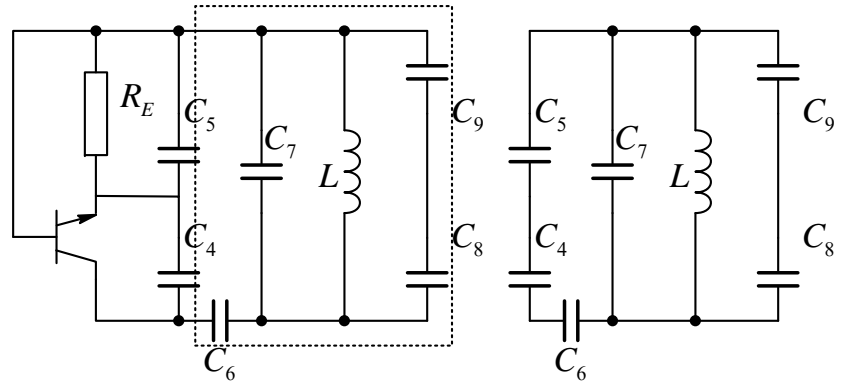
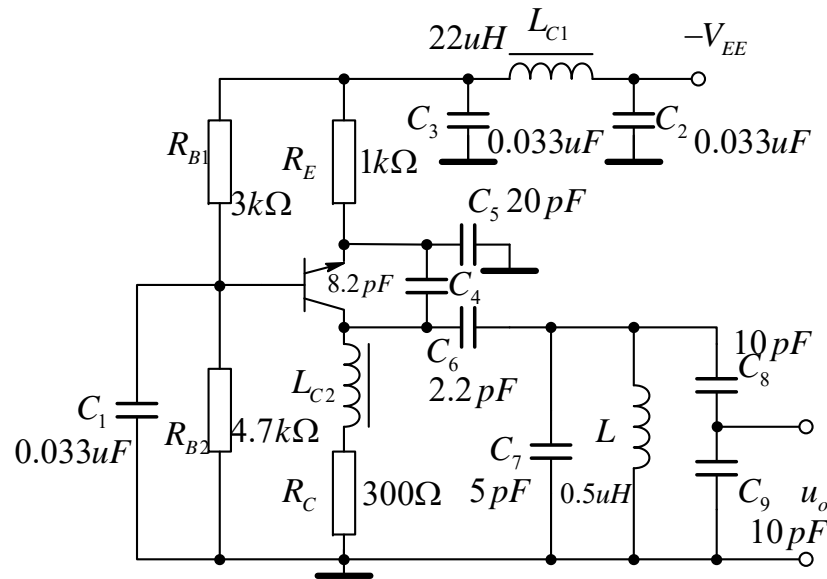
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}} \text{ 考虑互感 } M$$

高频电子线路

例 4.4 有一 LC 振荡电路如图 4.15 所示，试分析该电路，画出电路的交流通路，并求出振荡频率。



高频电子线路



$$C = C_7 + \frac{1}{\frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_5} + \frac{1}{C_6}} + \frac{1}{\frac{1}{C_8} + \frac{1}{C_9}} = 5 + \frac{1}{\frac{1}{8.2} + \frac{1}{20} + \frac{1}{2.2}} + \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{10}} \approx 11.6 pF$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.5 \times 10^{-6} \times 11.6 \times 10^{-12}}} \approx 66 MHz$$



石英晶体振荡器

一般 LC 振荡器的频率稳定度 $\Delta f / f_0$ 只能达到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。若要求频率稳定度超过 10^{-5} ，需用石英晶体振荡器。

1. 石英晶体滤波器的特点

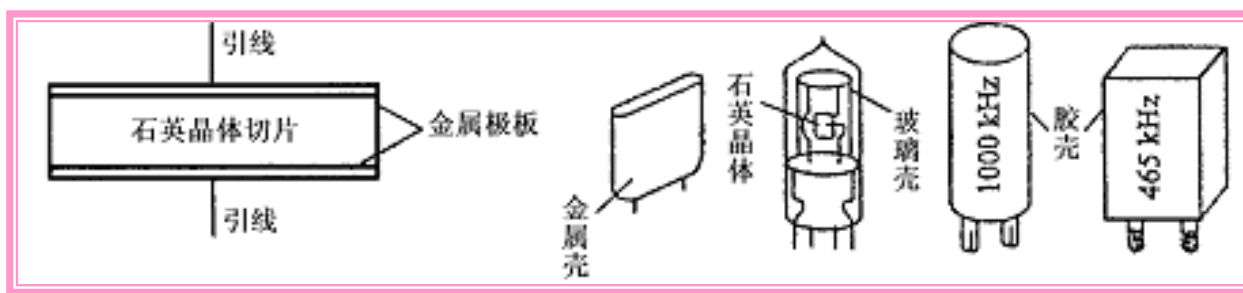
- 1) 石英晶体的物理和化学性能都十分稳定；
- 2) 晶体的 Q 值可高达数百万数量级；
- 3) 在串、并联谐振频率之间很狭窄的工作频带内，具有极陡峭的电抗特性曲线，因而对频率变化具有极灵敏的补偿能力。

因此，用石英晶体作为振荡回路元件，就能使振荡器的频率稳定度大大提高。



石英晶体振荡器

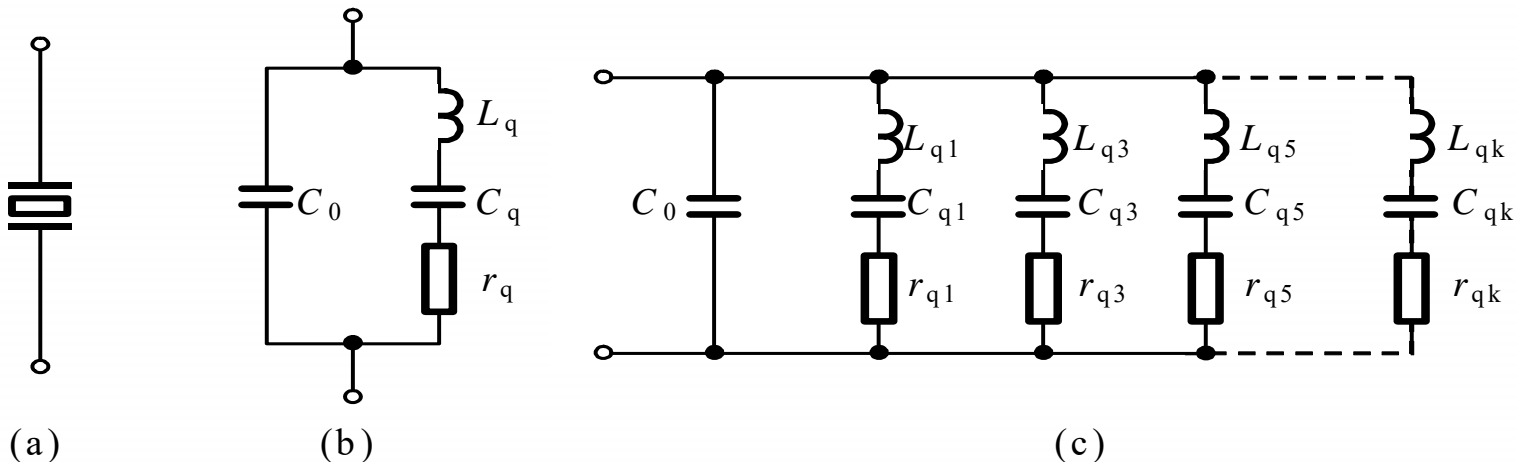
(1) 结构及外形



(2) 工作原理

压电效应

石英晶体振荡器



石英晶体谐振器

(a) 符号

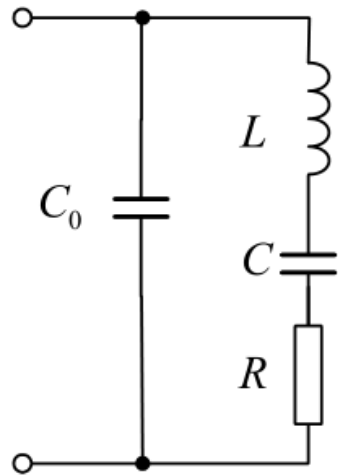
(b) 基频等效电路

(c) 完整等效电路

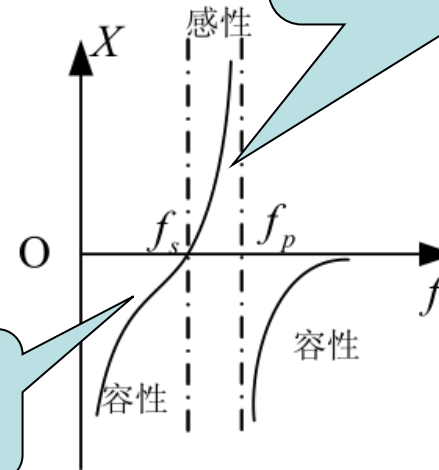
► 奇次谐波的泛音振动

除了以上基频振动模式外，石英片的振动还会产生奇次 $(2n-1)$ 谐波的泛音振动。基频振动模式时，产生奇次谐波谐振的支路因阻抗较高可忽略。

石英晶体振荡器



基音等效电路



呈现感性区域窄
稳频效果好

一般不用
电容区

电抗特性

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

串联谐振

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

并联谐振

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

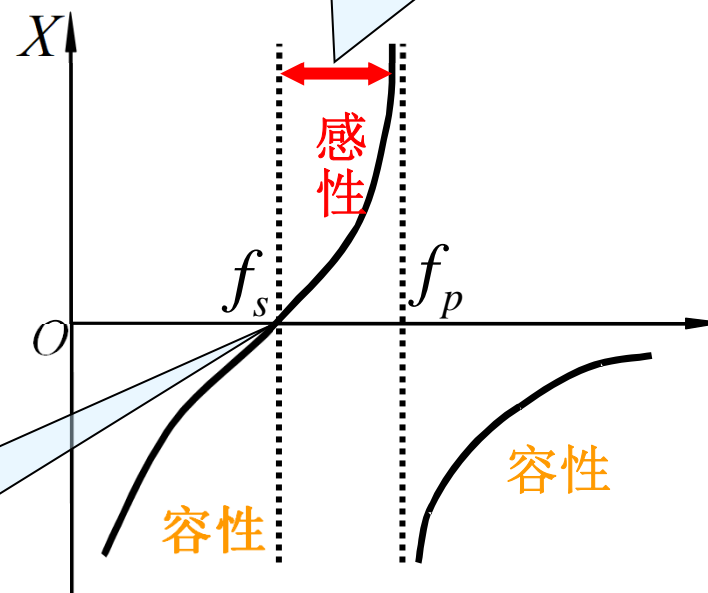
石英晶体振荡器

石英晶体振荡器的应用

- ▶ 并联型石英晶体振荡器
(作电感用)
- ▶ 串联型石英晶体振荡器
(做短线用)

$f_s < f < f_p$, 晶体呈感性
晶体作为高Q元件与其它元件并联
构成振动所需的并联谐振回路

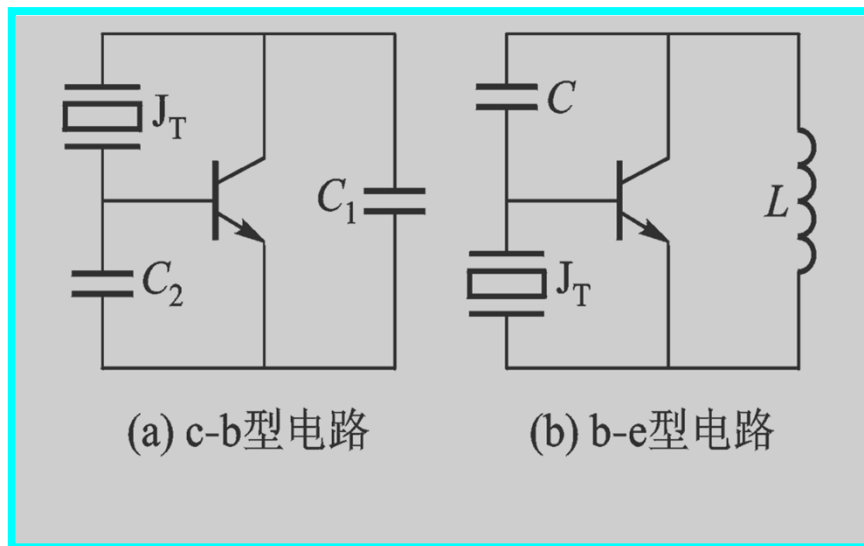
$f = f_s$, 晶体工作在
串联谐振状态
在振荡器中用作高
选择性短路元件



因此，振荡电路可分为两类：一类是作为等效电感元件，称为并联谐振型晶体振荡器；另一类是作为串联谐振元件，称为串联谐振型晶体振荡器。

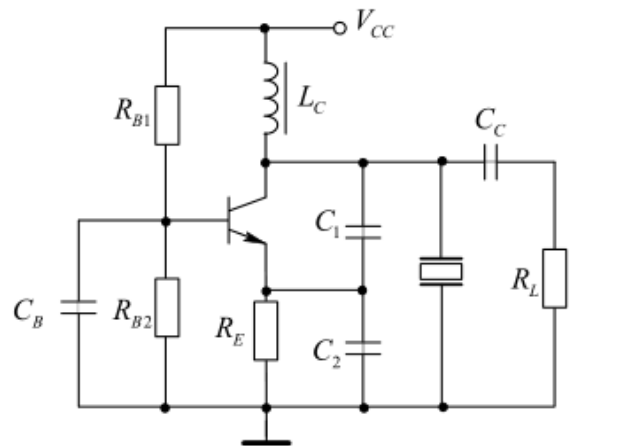
并联型石英晶体振荡器

这类晶体振荡器的振荡原理和一般反馈式 LC 振荡器相同，只是把晶体置于反馈网络的振荡回路之中，作为一个感性元件，并与其他回路元件一起按照三端电路的基本准则组成三端振荡器。根据这种原理，在理论上可以构成三种类型基本电路。

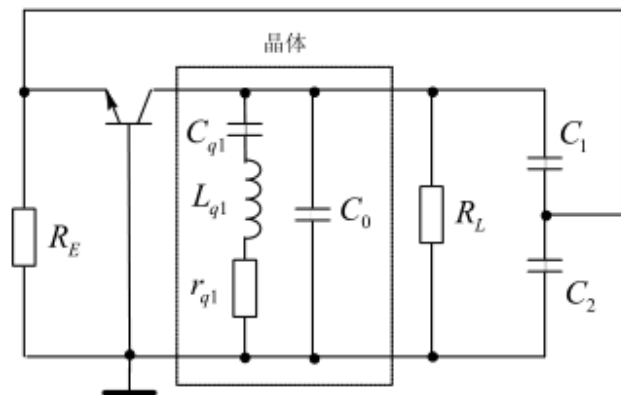


石英晶体在电路中作为等效电感元件使用，晶体工作于感性区（ $f_s \sim f_p$ 之间），在电路中等效为一个电感。与回路中其他元件按照三端电路的基本准则组成三端振荡器。

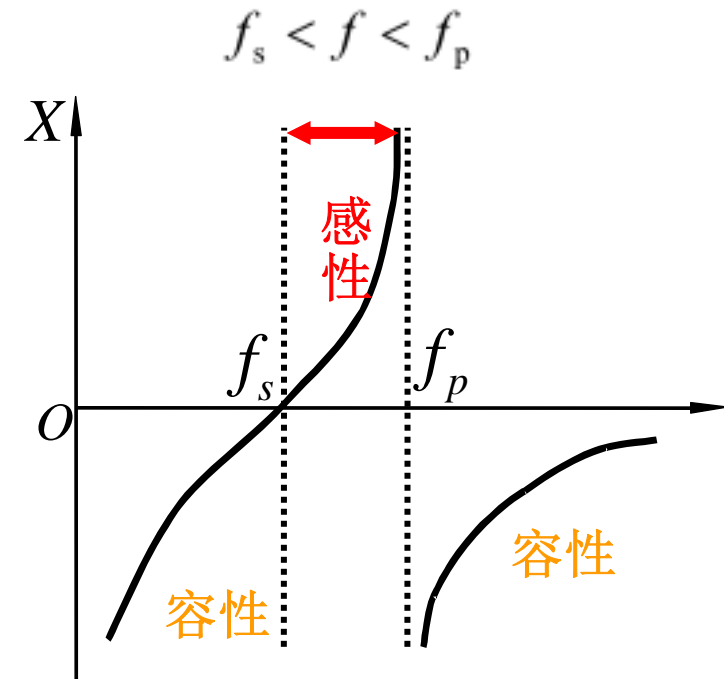
并联型石英晶体振荡器



(a)原理电路



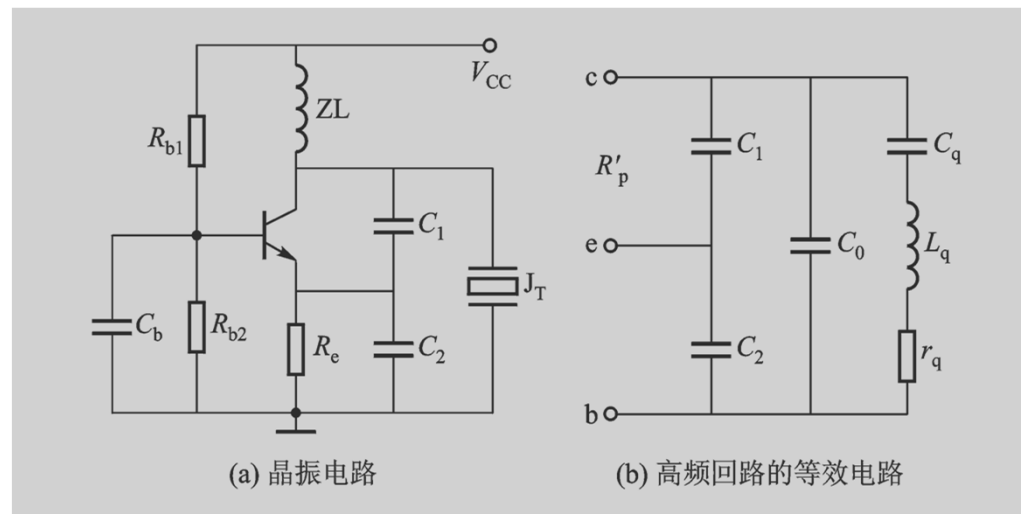
(b)交流等效电路



等效电感
$$L = -\frac{1}{\omega^2 C_0} \frac{1 - \omega_s^2 / \omega^2}{1 - \omega_p^2 / \omega^2}$$

并联型石英晶体振荡器（作电感用）

并联型石英晶体振荡器

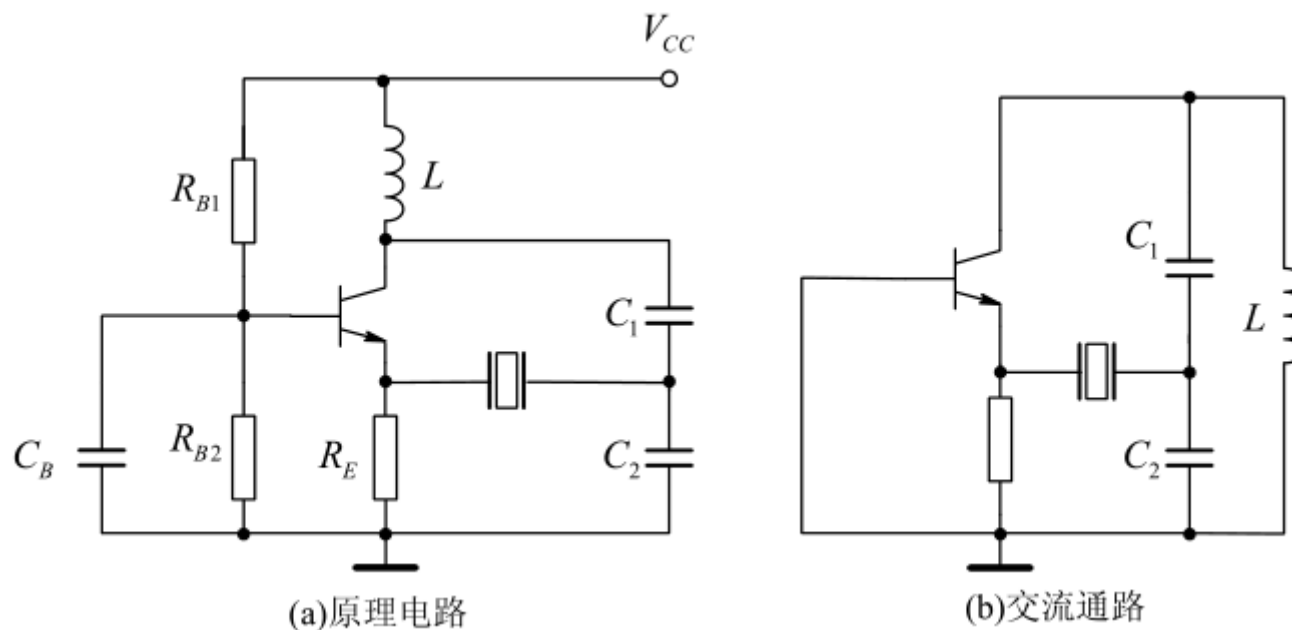


当 $\omega = \omega_s$ 时, $L=0$; 当 $\omega = \omega_p$ 时, $L \rightarrow \infty$ 。由于 ω_s 与 ω_p 区间很窄, 而谐振器的等效电感又从0变化到无穷大, 说明在此区间内等效电感的电抗曲线非常陡峭, 这对于稳频是非常有利的。若外部因素使谐振频率增大, 则根据石英谐振器的电抗特性, 必然会使等效电感 L 增大, 但由于振荡频率与 L 的平方根成反比, 因而又促使谐振频率下降, 趋近于原来的频率。

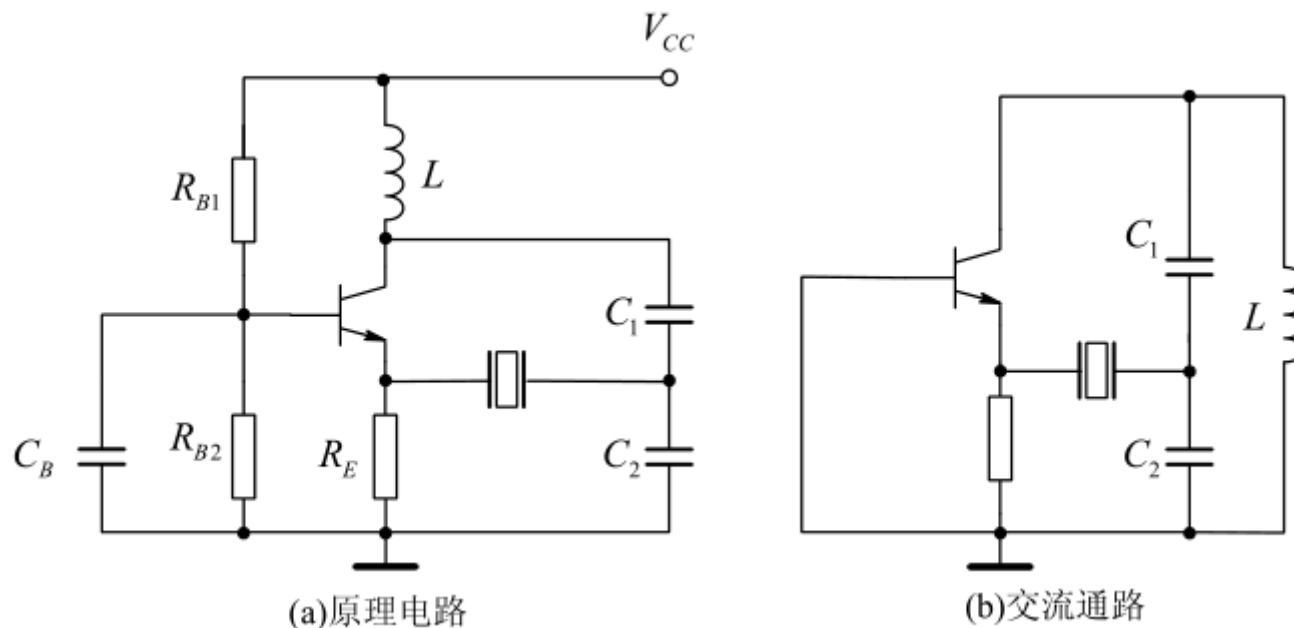
优点：频率稳定度

串联型石英晶体振荡器

串联型晶体振荡器一般是将石英谐振器用于正反馈中，利用其串联谐振时等效为短路元件，电路反馈最强，满足振幅起振条件，使振荡器在石英谐振器串联谐振频率 f_s 上起振。

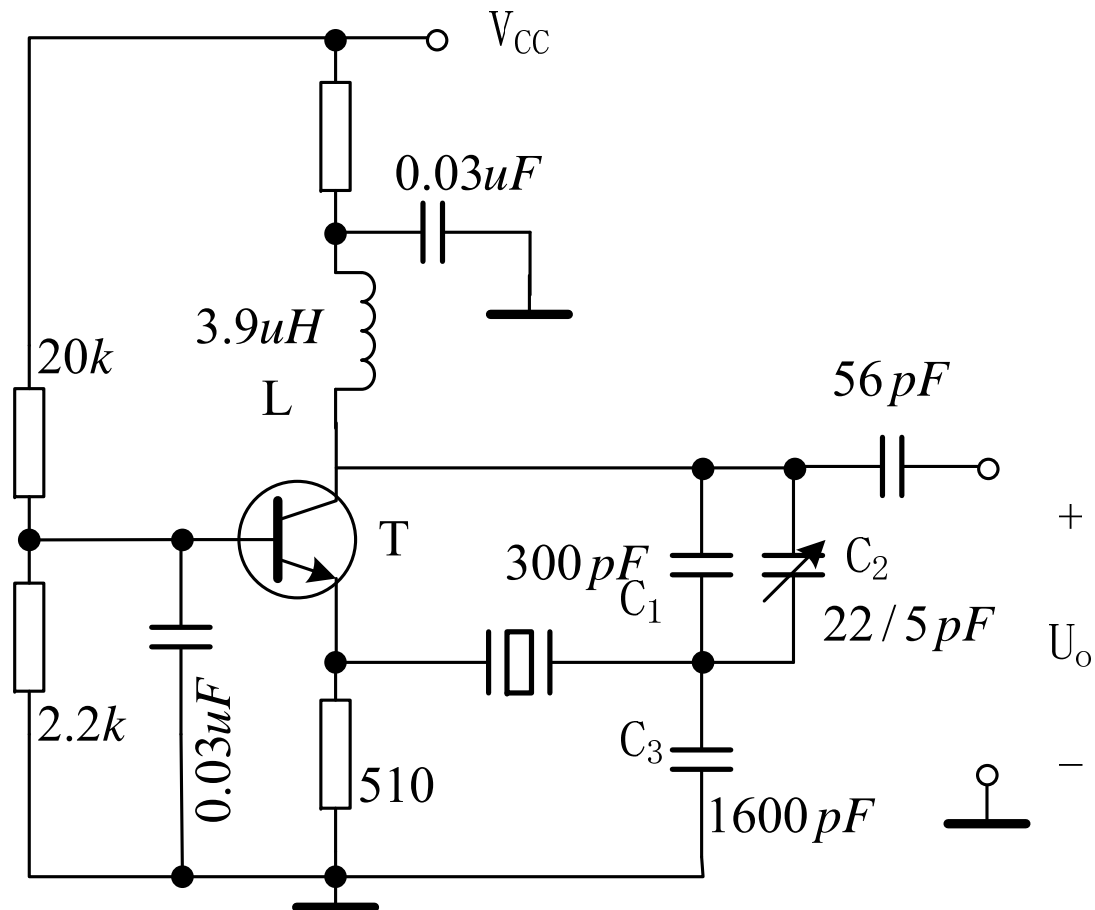


串联型石英晶体振荡器



若将晶体短路，它就是一个普通的电容反馈振荡器， L 、 C_1 、 C_2 构成振荡回路。当反馈信号频率等于串联谐振频率 f_s 时，石英谐振器的阻抗最小，且为纯电阻，此时正反馈最强，电路满足振荡的相位和幅度条件而产生振荡；当偏离串联谐振频率时，石英谐振器的阻抗迅速增大并产生较大的相移，振荡条件不满足而不能产生振荡。由此可见，这种振荡器的振荡频率受石英晶体串联谐振频率 f_s 的控制，具有很高的频率稳定度。在串联型晶体振荡器中， LC 回路一定要调谐在石英谐振器的串联谐振频率上。

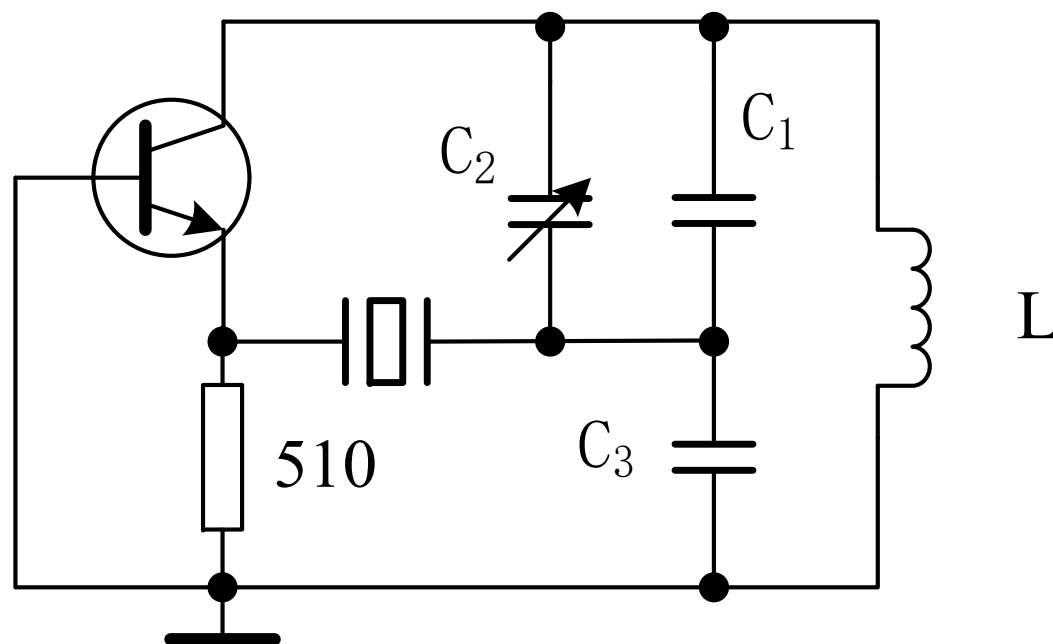
例：分析晶体作用



交流通路

晶体：

串联，短路线



$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \frac{(C_1 + C_2)C_3}{C_1 + C_2 + C_3}}}$$

本章小结

- 振荡器原理
 - 平衡条件
 - 稳定条件
 - 起振条件
- 振荡器电路
 - 反馈振荡器
 - LC三点振荡器
 - 晶体振荡器



本章小结

反馈振荡器是由放大器和反馈网络组成的具有选频能力的正反馈系统。反馈振荡器必须满足起振、平衡和稳定三个条件，每个条件中应分别讨论其振幅和相位两个方面的要求。在起振时，环路增益的幅值必须大于**1**，环路增益的相位应为 **2π** 的整数倍；在平衡状态时，环路增益的幅值等于**1**，环路增益的相位应为 **2π** 的整数倍；在稳定点，环路增益的幅值具有负斜率的增益-振幅特性，环路增益的相位具有负斜率的相频特性。



主要的正弦波振荡器

- 三点式振荡器
 - 电感反馈振荡器（哈特莱振荡器）
 - 电容反馈振荡器
 - 基本电容反馈式振荡器（考毕兹振荡器）
 - 克拉拨振荡器
 - 席勒振荡器
- 石英晶体振荡器
 - 串联型晶体振荡器（短路线用）
 - 并联型晶体振荡器（电感用）
 - 皮尔斯振荡器（电容三点式）
 - 密勒振荡器（电感三点式）



高频电子线路

三点式振荡电路是**LC**正弦波振荡器的主要形式，可分成电容三点式和电感三点式两种基本类型。频率稳定度是振荡器的主要性能指标之一。为了提高频率稳定度，必须采取一系列措施，包括减小外界因素影响变化的影响和提高电路抗外界因素变化影响的能力两个方面。克拉泼振荡器和西勒振荡器是两种较实用的电容三点式改进型电路，它们减弱了晶体管与回路的耦合，使晶体管对回路的影响减小，提高了振荡频率稳定度。集成电路正弦波振荡器电路简单，调试方便，需外加**LC**元件组成选频网络。

晶体振荡器的频率稳定度很高，有并联型与串联型两种类型。在并联型晶体振荡器中，石英谐振器的作用相当于一个电感；而在串联型晶体振荡器中，利用石英谐振器的串联谐振特性，以低阻抗接入电路。石英晶体振荡器的振荡频率的可调范围很小。为了提高晶体振荡器的振荡频率，可采用泛音晶体振荡器，但需采取措施抑制低次谐波振荡，保证其只谐振在所需要的工作频率上。

