

第五章 正弦波振荡器

(8学时)

重点：产生振荡的条件，各种类型振荡器的典型电路分析及相位条件的判断，起振条件的分析与计算。

难点：振荡的建立过程；相位平衡条件的判断及起振条件的分析与计算。

- **高频功率放大器：**在输入信号控制下，把直流电源提供的直流能量转换为按信号规律变化的交变能量电路。
- **振荡器：**不需要输入信号控制，能自动的将直流电源的能量转变为特定频率和振幅的正弦交变能量的电路。
- **正弦波振荡器广泛应用于各种电子设备中：**无线发射机的载波信号源、超外差接收机的本地振荡信号源、电子测量仪器中的正弦波信号源、数字系统中的时钟信号源等，要求是振荡频率和振荡振幅的准确性和稳定性，尤其是振荡频率的准确性和稳定性最为重要。
- **正弦波振荡器的另一类应用：**高频加热设备或医用电疗仪器中的正弦交变能源，对振荡器的要求是高效率地产生足够大的正弦交变功率，而对振荡频率的准确性和稳定性不做苛求。

分类： ● **按输出波形分** $\left\{ \begin{array}{l} \text{正弦波振荡器} \\ \text{非正弦波振荡器} \end{array} \right.$

● **按原理、性质分** $\left\{ \begin{array}{l} \text{反馈振荡器} \\ \text{负阻振荡器} \end{array} \right.$

- 正反馈振荡器应用最广，在放大电路中加入正反馈，当正反馈足够大时，放大器产生振荡，即放大器不需要外加激励信号，而是由本身的正反馈信号来代替外加激励信号的作用。
- 负阻振荡器，是将负阻器件接入谐振回路中，利用负阻器件的负电阻去抵消回路中的损耗，从而产生等幅的自由振荡。

根据振荡器选频网络的不同，可以将正弦波振荡器分为三类：

(1) RC正弦波振荡电路：选频网络由R,C元件构成，一般用来产生几赫兹到几十千赫兹的频率较低的信号。

(2) LC正弦波振荡电路：选频网络由L,C元件构成，一般用来产生几十千赫兹到几百兆赫兹的高频信号。

(3) 石英晶体振荡电路：选频网络主要由石英晶体元件构成，一般用来产生几百千赫兹或更高频率的信号，频率更稳定。

5.1 反馈型振荡器的基本原理

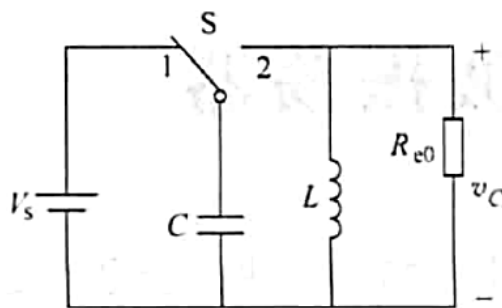
5.1.1 振荡的产生

一、并联谐振回路中的自由振荡现象

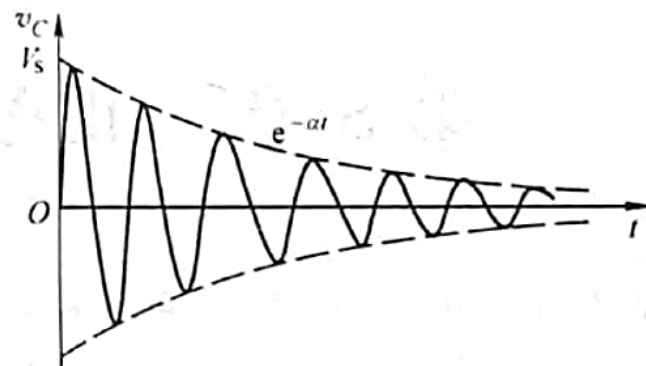
$$v_c(t) = V_s e^{-\alpha t} \cos \omega_{osc} t$$

$$\alpha = \frac{1}{2R_{e0}C}$$

$$\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$



a)



b)

图 5.1.1 并联谐振回路的自由振荡现象

a) LC 并联谐振回路 b) 阻尼振荡波形

二、产生无阻尼振荡的方法

RLC并联谐振回路中自由振荡衰减（产生阻尼振荡）的原因？

若回路无损耗, 即 $R_{e0} \rightarrow \infty$, 则衰减系数

$\alpha \rightarrow 0$, 回路两端电压为

$$v_c(t) = V_S \cos \omega_{osc} t \quad (\text{等幅正弦振荡})$$

所以产生无阻尼振荡的方法是：

- (1) 正反馈法：把输出信号反馈到放大器输入端，进行放大，补充能量
- (2) 负阻法：负阻抵消正电阻的消耗，比如隧道二极管。

5.1.2 反馈型振荡器的原理分析

反馈振荡器的组成框图：

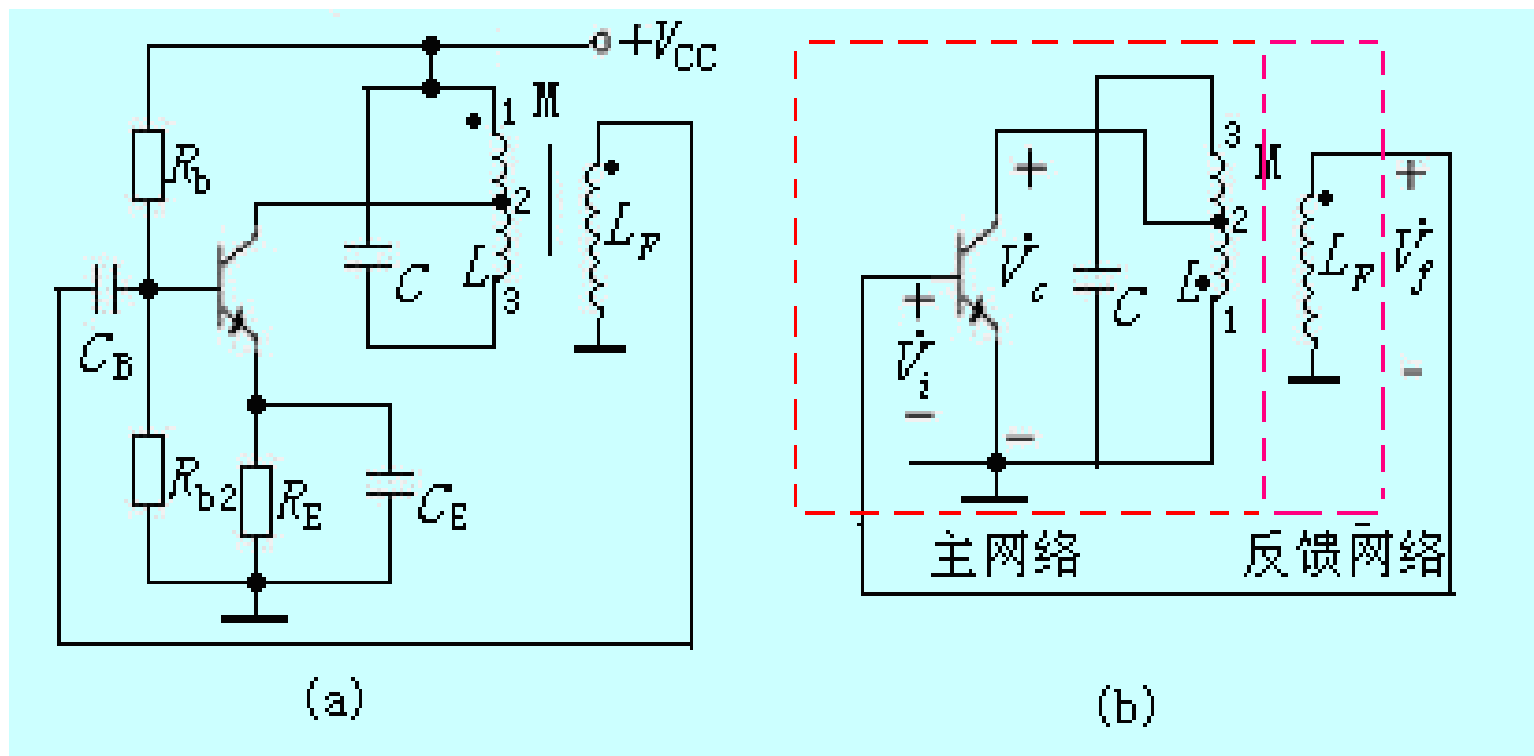


图5.1.3 互感耦合反馈振荡器
(a)原理电路 (b)交流通路

反馈振荡器的组成框图：

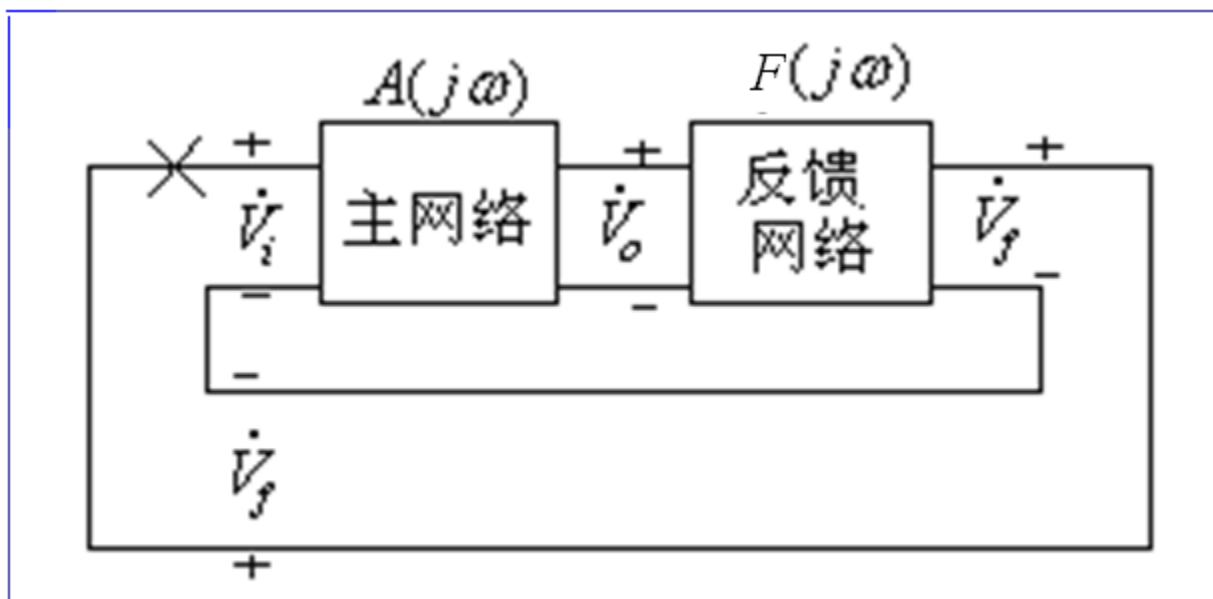


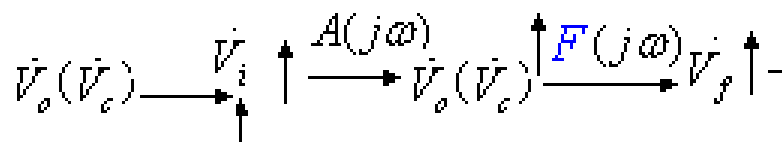
图 5. 1. 2 反馈型振荡器组成框图

主 网 络：放大器件和选频网络组成的放大器；
反馈网络：一般是无源器件组成。

振荡的产生

- **当振荡器接通电源后**，开始有瞬变电流产生。瞬变电流中含有非常宽的频带，但由于谐振回路的选择性，它只选出了本身谐振频率的信号。由于正反馈的作用，谐振信号频率越来越强，即形成稳定的振荡。瞬变电流中其他的频率成分则为谐振回路过滤掉，不被放大，逐渐消失。
- **成为反馈型的正弦波振荡电路，需要满足的条件：**保证接通电源后从无到有地建立起振荡的起振条件，保证进入平衡状态、输出等幅持续振荡的平衡条件，以及保证平衡状态不因外接不稳定因素影响而受到破坏的稳定条件。

一、振荡的建立过程

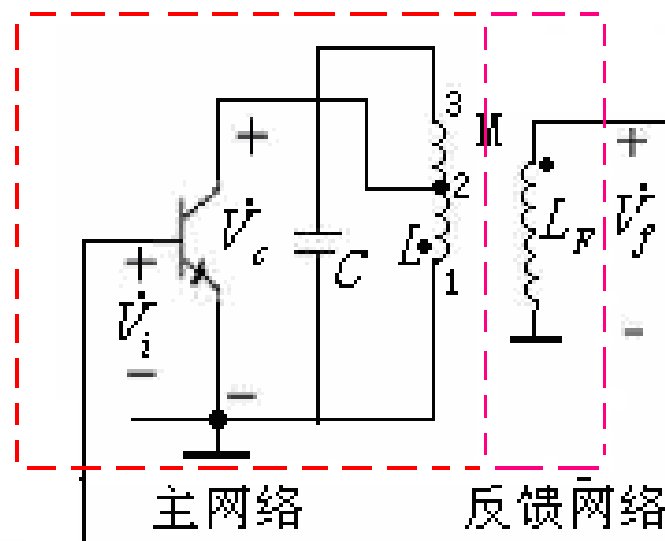


开始起振时，环路增益大于1，振荡信号不断增长。但是，信号不会一直增长，由于内稳幅或外稳幅的作用，环路增益随着信号幅度增大而下降，当信号幅度达到一定程度后，环路增益降为1。

最终将使 $\dot{V}_o(\dot{V}_i)$

保持恒定不变，

从而形成等幅持续振荡。



(b)

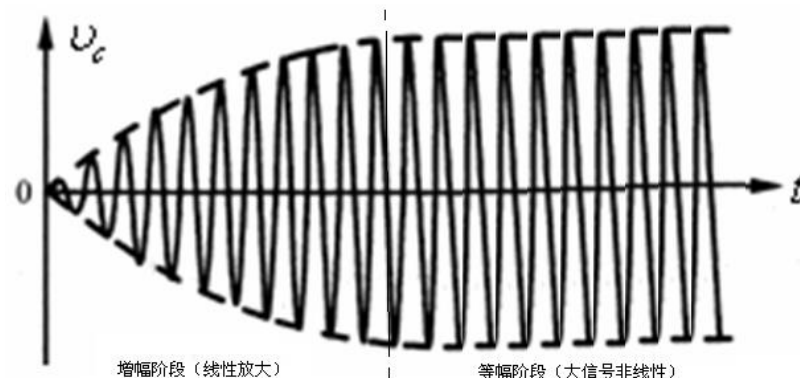


图 5.1.5 振荡建立过程的波形

根据图5.1.2知，各信号电压具有如下关系

$$\begin{cases} A(j\omega) = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = A(\omega)e^{j\phi_A(\omega)} \\ F(j\omega) = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = F(\omega)e^{j\phi_F(\omega)} \end{cases}$$

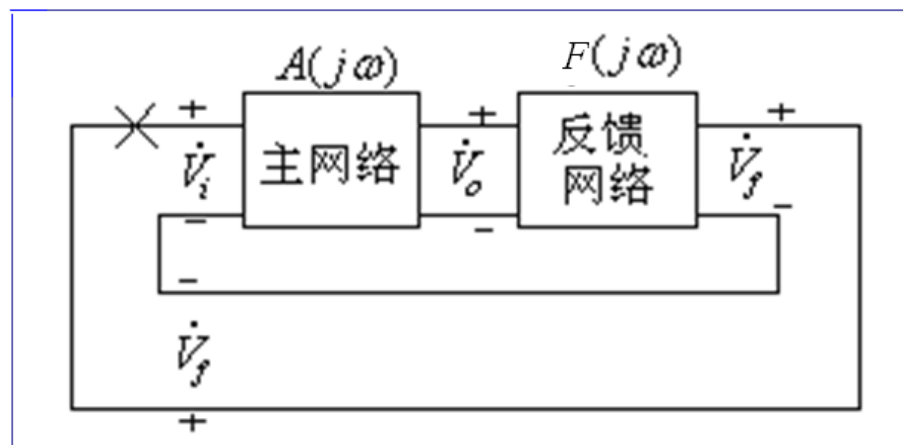


图5.1.2 反馈型振荡器组成框图

所以 $\dot{V}_f = F(j\omega)\dot{V}_o = A(j\omega)F(j\omega)\dot{V}_i$

环路增益: $T(j\omega) = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_i} = A(j\omega)F(j\omega) = A(\omega)F(\omega)e^{j[\phi_A(\omega)+\phi_F(\omega)]}$

5.1.3 反馈振荡的条件

1、平衡条件

当 $\dot{V}_f = \dot{V}_i$ 时（非线性阶段），电路维持等幅持续振荡。所以，维持等幅振荡的平衡条件为

$$\begin{cases} T(\omega_{osc}) = 1 & \text{振幅平衡条件} \\ \varphi_T(\omega_{osc}) = 2n\pi & \text{相位平衡条件} \end{cases}$$

或表示为

$$\begin{cases} AF = 1 & \text{振幅平衡条件} \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi & \text{相位平衡条件} \end{cases}$$

2、起振条件

由振荡建立过程的起振循环得出，使振幅不断增长的条件（起振条件）是 $\dot{V}_f > \dot{V}_i$ 。

$$T(j\omega_{osc}) = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_i} > 1 \quad \text{或} \quad (\dot{A}\dot{F} > 1)$$

或表示为
$$\begin{cases} T(\omega_{osc}) > 1 \\ \phi_T(\omega_{osc}) = 2n\pi \end{cases}$$

或
$$\begin{cases} AF > 1 (\text{振幅起振条件}) \\ \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi (\text{相位起振条件}) (n=0,1,2,\dots) \end{cases}$$

$T(\omega_{osc})$ 应该具有的特性:

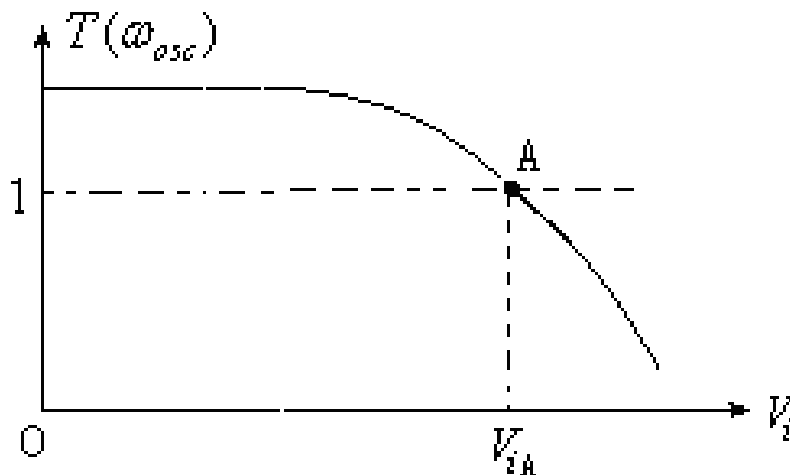


图5.1.4 满足起振条件和平衡条件的环路增益特性

结论: 振荡器起振时, $T(\omega_{osc}) > 1$, V_i 迅速增长, 而后 $T(\omega_{osc})$ 下降, V_i 的增长速度变慢, 直到 $T(\omega_{osc}) = 1$ 时, V_i 停止增长, 振荡器进入平衡状态。在相应的振幅在 V_{iA} 上维持等幅振荡。

3、起振条件和平衡条件的一般分析

(1) 电路合闸通电的瞬间，放大器具有放大功能，即 $T(j\omega_{osc}) = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_i} > 1$ ，满足起振条件。

(2) 电路中必须包含非线性环节以满足平衡条件（稳幅）的要求。

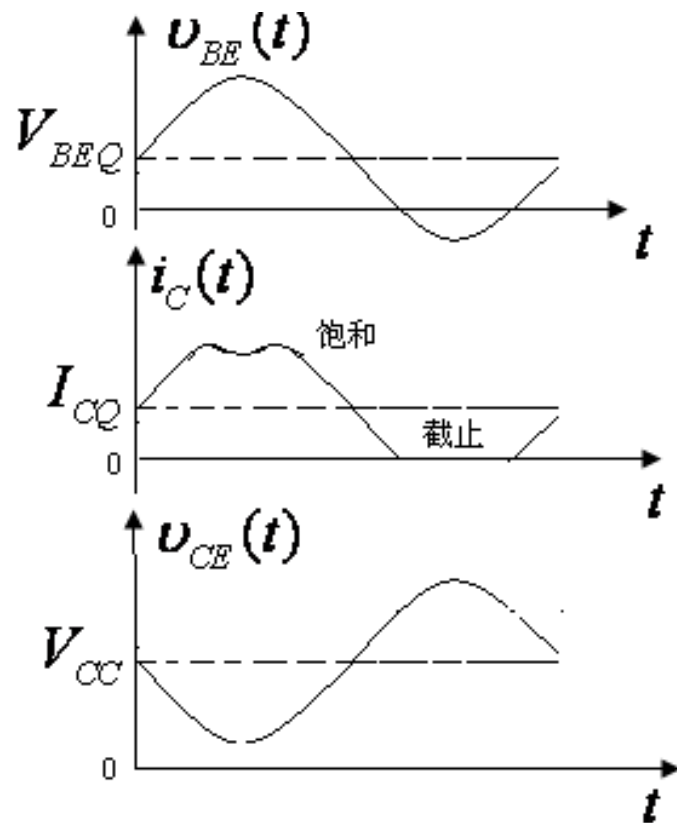
(3) 电路中要有正反馈，满足相位条件。

(4) 电路的振荡频率由相位平衡条件确定。即
振荡频率近似等于谐振回路的谐振频率。

4、分析起振过程和平衡过程的要点

(1) 电路起振时，放大器工作在小信号线性放大（甲类）状态，可用小信号等效电路法分析、计算电路的环路增益。

(2) 电路在振荡建立过程中，若不施加任何外界条件，放大器将从小信号线性放大状态过渡到大信号非线性放大状态，集电极电流出现非线性失真。



(3) 实际电路

电路中 R_E 的作用:

帮助电路由 $T = AF > 1$

快速自动调节到平衡状态, 即

$T = AF = 1$ 的状态, 从而缩短过渡过程和减弱管子的非线性工作程度, 以改善输出信号波形, 减少失真。

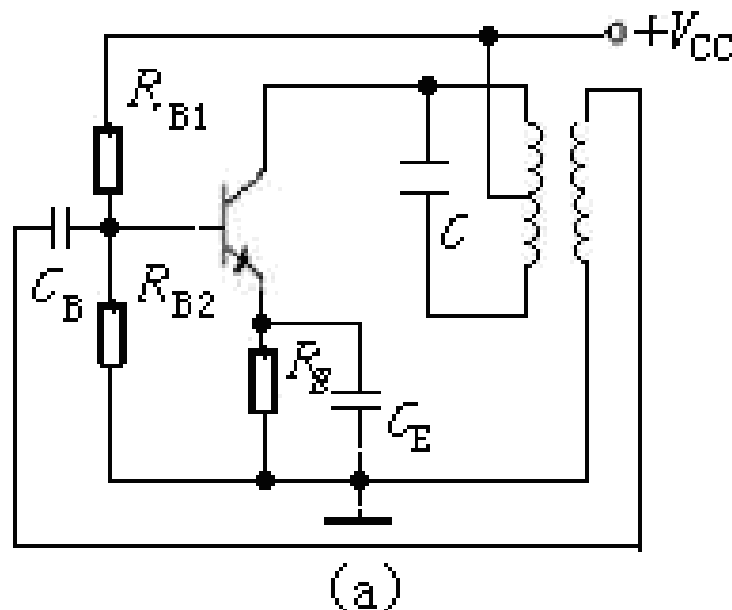


图5.1.9 振荡器的偏置效应

$$V_{BEQ} = V_{BB} - I_{BQ}R_B - I_{EQ}R_E$$

$$V_{BB} = \frac{V_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}} R_{B2} \quad R_B = R_{B1} // R_{B2}$$

起振后，随着 \dot{V}_i 不断增大，晶体管进入非线性区，导致电流 i_B 、 $i_E (\approx i_C)$ 正负半周不对称，其平均分量 I_{B0} 、 I_{E0} 增大，使

$$I_{E0} > I_{EQ} \rightarrow I_{E0}R_E \uparrow$$

$$\rightarrow V_{BE} \downarrow = V_{BB} - I_{B0} \uparrow R_B - I_{E0} \uparrow R_E$$

产生自偏压效应

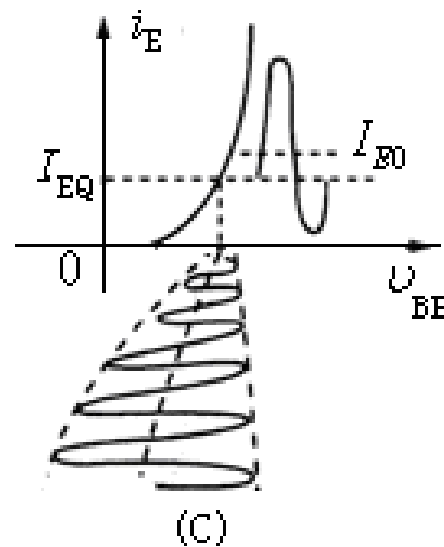
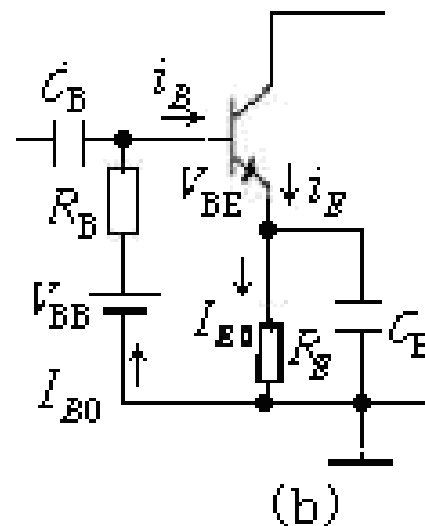


图5.1.9 振荡器的自偏置效应

自偏压效应使振荡器的环路增益 T 随 V_i 的变化曲线如图5.1.8中虚线所示。

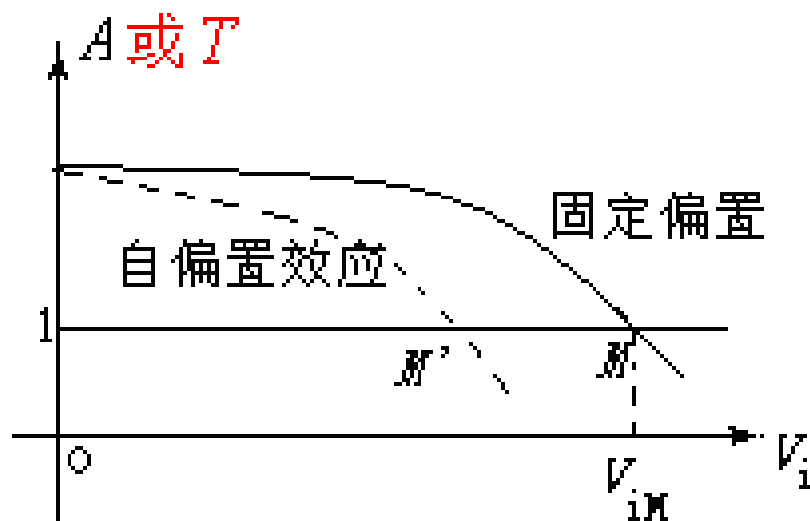
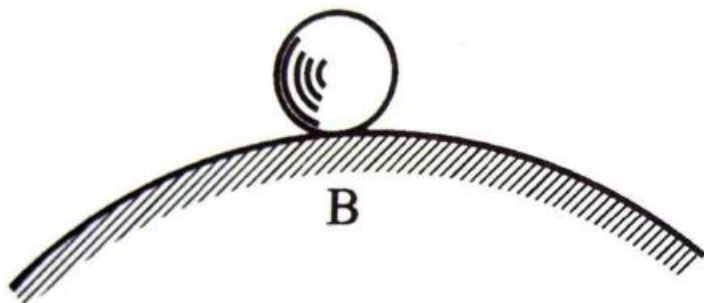
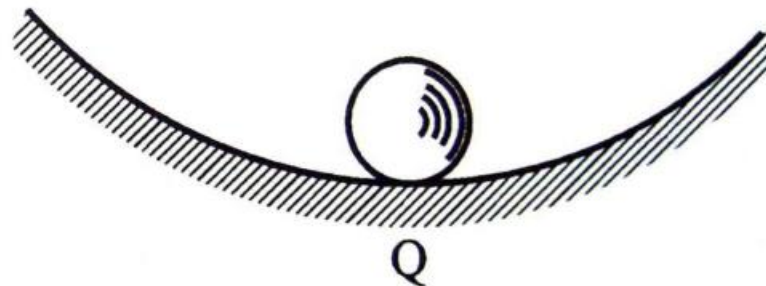


图5.1.8 放大器的增益 A (或 T) 随 V_i 变化的曲线

二、振荡器平衡状态的稳定条件



(a) 不稳定平衡



(b) 稳定平衡

平衡状态的稳定是指当平衡条件遭到破坏后，电路能够在原平衡点附近重新建立起新的平衡。一旦外部影响因素消失，振荡器自动恢复到原来的平衡状态。

1. 振幅稳定条件

A点满足: $T(\omega_{osc}) = 1$

当外界因素的影响, 使

$$\dot{V}_i \uparrow > \dot{V}_{iA} \xrightarrow{T(\omega_{osc}) < 1} \dot{V}_o(\dot{V}_c) \downarrow$$

$$\xrightarrow{F} \dot{V}_f \downarrow \rightarrow \dot{V}_i \downarrow \rightarrow \dot{V}_{iA}$$

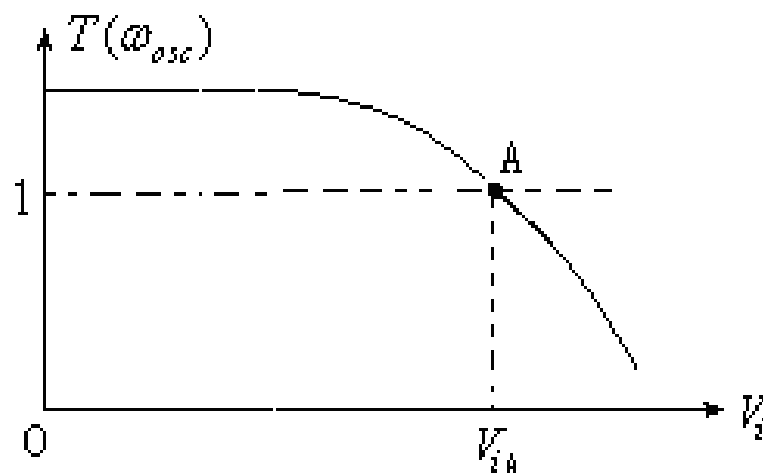


图5.1.4 满足起振条件和平衡条件的环路增益特性

当外界因素的影响，使

$$\dot{V}_i \downarrow < \dot{V}_{iA} \xrightarrow{T(\omega_{osc}) > 1} \dot{V}_o(\dot{V}_c) \uparrow$$

$$\xrightarrow{F} \dot{V}_f \uparrow \rightarrow \dot{V}_i \uparrow \rightarrow \dot{V}_{iA}$$

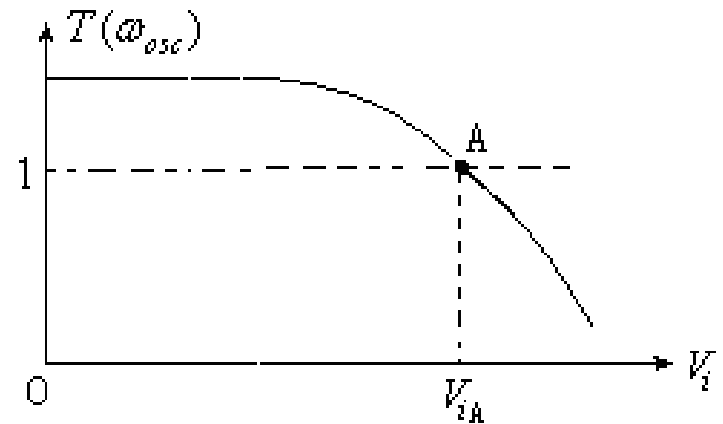


图5.1.4 满足起振条件和平衡条件的环路增益特性

得到振荡器振幅稳定的条件是：

$$\left. \frac{\partial T(\omega_{osc})}{\partial V_i} \right|_{V_i=V_{iA}} < 0$$

即在平衡点附近，环路增益的幅频特性具有负斜率变化的规律。

2、相位（频率）稳定条件

(1) 讨论前的有两点说明：

① $\because \omega = \frac{d\varphi}{dt} \therefore$ 相位变化必然引起频率变化。

在相同时间内，相位超前，意味着频率必然上升；相位滞后，必然是频率下降。因此，相位稳定条件也就是频率稳定条件。

②角频率 ω_{osc} 值是根据其相位平衡条件求出的，所以在此频率 ω_{osc} 处，经过一个循环，反馈振荡器的反馈电压 V_f 与 V_i 相位相差 2π ，即环路增益的相位为 $\varphi_T(\omega) = 2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

(2) 相位（频率）稳定条件分析

① 设在 ω_{osc} 处 $\varphi_T(\omega_{osc}) = 2n\pi$

② 由于外界因素的影响，使

$$\varphi_T(\omega_{osc}) = 2n\pi + \Delta\varphi \quad (\Delta\varphi \text{ 相位偏移})$$

A、当 $\Delta\varphi > 0$ 时，说明 \dot{V}_f 超前 \dot{V}_i 一个 $\Delta\varphi$ 相角，使每次经过放大和反馈后， \dot{V}_f 一次比一次超前 \dot{V}_i ，振荡周期缩短，振荡频率升高。

B、当 $\Delta\varphi < 0$ 时，说明 \dot{V}_f 滞后 \dot{V}_i 一个 $\Delta\varphi$ 相角，使每次经过放大和反馈后 \dot{V}_f 一次比一次滞后 \dot{V}_i ，使振荡周期增长，频率降低。

所以振荡频率随 $\Delta\varphi$ 的变化关系为： $\frac{\Delta\omega}{\Delta\varphi} > 0$

又知： $\varphi_T = \varphi_A + \varphi_F$ 本身是频率的函数，
若使 φ_T 随 ω 的变化具有负斜率变化的特性，即

$$\left. \frac{\Delta\varphi_T}{\Delta\omega} \right|_{\omega=\omega_{osc}} < 0$$

则可抵消外界因素
的影响。

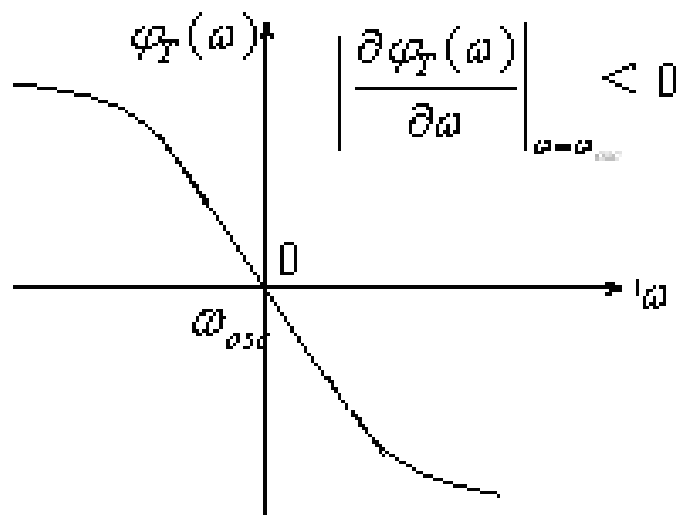


图5.1.6 满足相位稳定条件的 $\varphi_T(\omega)$ 特性

所以相位稳定条件是： $\left. \frac{\partial \varphi_T}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_{osc}} < 0$

$$\text{又知: } \varphi_T(\omega) = \varphi_A(\omega) + \varphi_F(\omega) = \varphi_{\dot{g}_m} + \varphi_z + \varphi_F(\omega)$$

($\varphi_{\dot{g}_m}$ 放大管产生的相移, φ_z 并联谐振回路的相移)

其中 $\varphi_{\dot{g}_m}$ 和 $\varphi_F(\omega)$ 几乎不随频率而变, 所以有

$$\frac{\partial \varphi_T}{\partial \omega} = \frac{\partial \varphi_z}{\partial \omega} + \frac{\partial \varphi_F}{\partial \omega} + \frac{\partial \varphi_{\dot{g}_m}}{\partial \omega} \approx \frac{\partial \varphi_z}{\partial \omega}$$

只要选频网络具有负斜率变化的相频特性，即

$$\left. \frac{\partial \varphi_z(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_{osc}} < 0$$

振荡电路就可满足相位稳定条件。

由第一章的分析知：**LC并联回路的相频特性具有负斜率变化的规律。**

5.1.4 电路组成及分析方法

1、振荡器的电路组成

{ 选频网络：进行能量交换的储能元件，并决定频率。
放大器件：进行能量转换。
反馈网络：补充回路能量，抵消其损耗。

2、分析时应该考虑的几个问题

(1) 可变增益放大器应有正确的直流偏置，电路开始应工作在甲类状态。

(2) 刚起振时 $T(\omega_{osc}) = AF > 1$, 而 $F < 1$ (无源器件组成的反馈网络), 所以应使 $A(\omega_{osc}) > 1$ (如采用共发射极, 共基极组态的电路) , 且负载不能太小。

(3) 在 ω_{osc} 处 $\varphi_T = 2n\pi$, 即环路应是正反馈。

(4) 选频网络应具有负斜率的相频特性。

作业： 5.13 5.14 5.15 5.16

预习： 5.2