



第四章 正弦振荡器

- 4. 1 反馈型正弦振荡器基本原理
- 4. 2 振荡器分析预备知识
- 4. 3 正弦振荡器分析举例
- 4. 4 石英晶体正弦波振荡器
- 4. 5 阻容振荡器（RC振荡器）



4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

1. 定义

产生幅度和频率符合要求的周期信号，无需外来电路干预的信号发生电路。

2. 分类

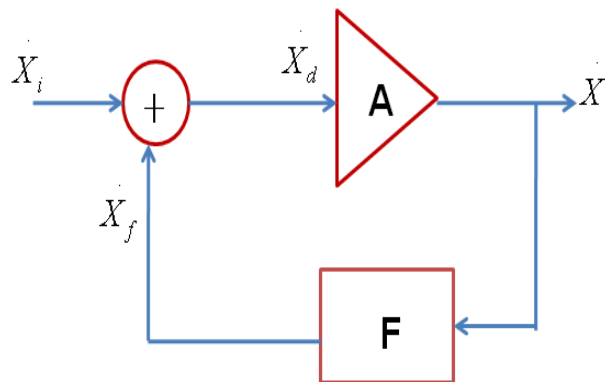
- ①按波形
 - 简谐振荡器（正弦波）
 - 多谐振荡器（方波、三角波、锯齿波）
- ②按机理
 - 反馈型振荡器（正反馈）
 - 负阻型振荡器：利用负阻器件在一定条件下对负载呈现负阻（等效为一个源）的特性，达到补充能量维持振荡的目的）
- ③按选频网络
 - LC振荡器
 - RC振荡器
 - IC振荡器（恒流源）
- ④按器件
 - 晶体管振荡器
 - 场效应管振荡器
 - 差分对振荡器
- ⑤按频率：
 - 高频振荡器
 - 低频振荡器



4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

3. 反馈型正弦振荡器工作原理

(1) 正反馈原理



$$\dot{X}_i = \dot{X}_d - \dot{X}_f \quad \text{开环增益: } \dot{A} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_d} \quad \text{反馈系数: } \dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o}$$

$$\text{闭环增益: } \dot{A}_F = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_i} = \frac{\dot{A} \dot{X}_d}{\dot{X}_d - \dot{A} \dot{F} \dot{X}_d} = \frac{\dot{A}}{1 - \dot{A} \dot{F}}$$

$$\text{环路增益: } \dot{T} = \dot{A} \dot{F} = \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_d} \quad \text{当 } \dot{T} = 1 \text{ 时, } \dot{A}_F \rightarrow \infty - \text{自激状态}$$

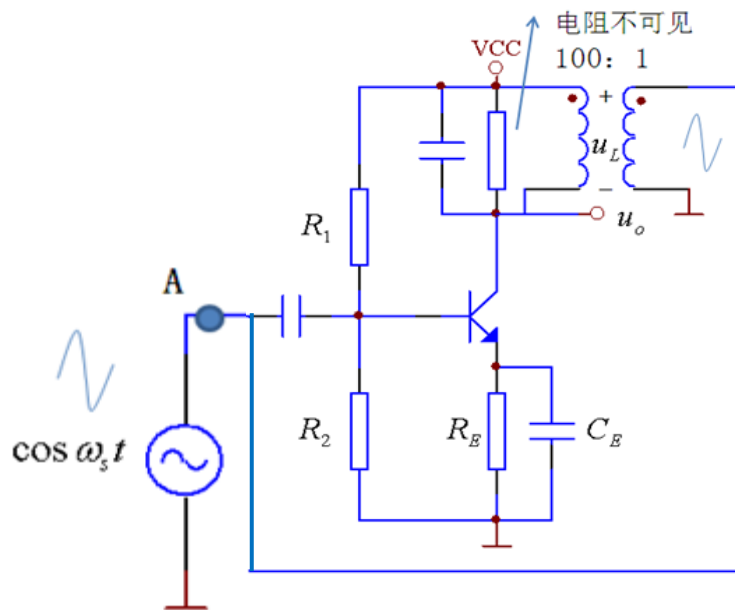
4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

3. 反馈型正弦振荡器工作原理

(2) 基本结构

$$u_o = -u_L + V_{CC}$$

变压器耦合式



四个基本
组成部分

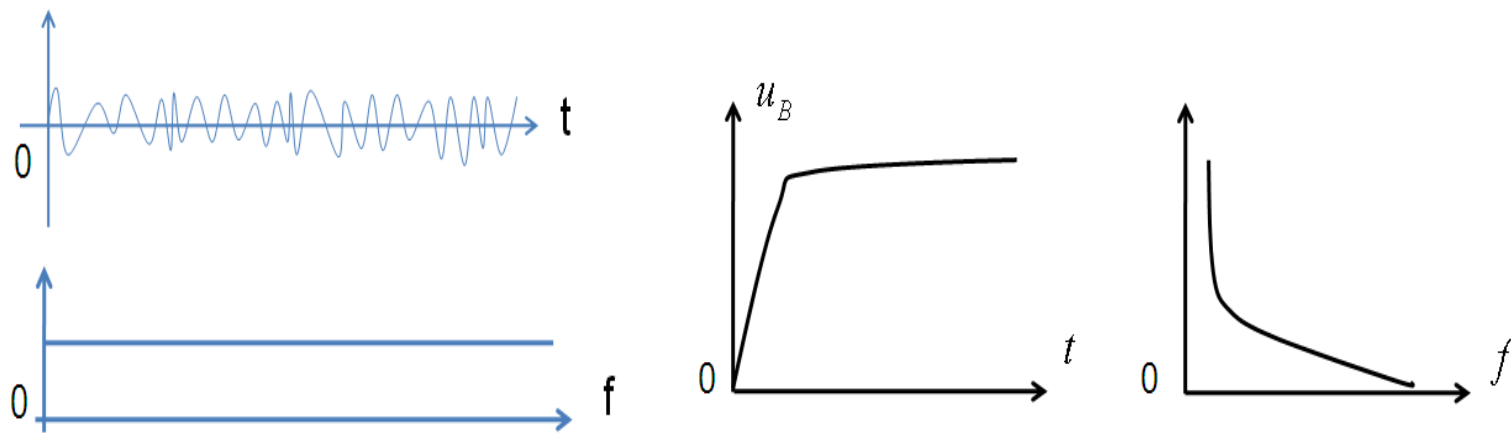
- ①放大器：晶体管放大电路
- ②选频网络：RLC
- ③反馈环节：变压器
- ④稳幅环节：自限幅特性

4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

(3) 工作原理

初始激励： 电路接通时，电源的电扰动、电路中的热噪声。

①**热噪声：** 电阻内部的自由电子在常温下作杂乱无章的运动，包含 $0 \rightarrow \infty$ 所有频率分量，且这些频率分量的能量相同。



②**阶跃信号（电扰动）：** 频谱连续。



4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

(3) 工作原理

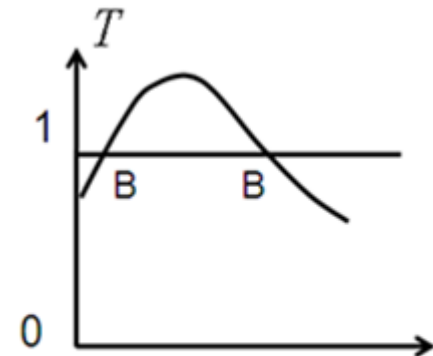
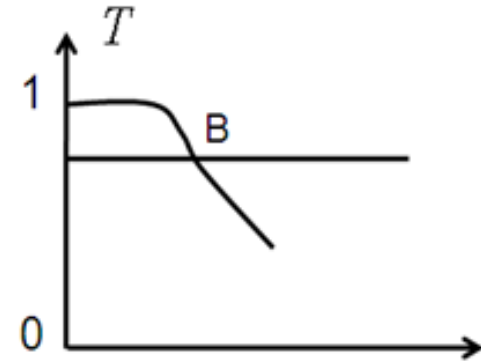
起振条件（小信号状态）：

$$\dot{T} = \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| > 1 & \text{幅值条件} \\ \varphi_{A_0F_0} = \varphi_{A_0} + \varphi_{F_0} = 2n\pi & \text{相位条件} \end{cases}$$

相位条件 正反馈

平衡条件（大信号状态）：

$$\dot{T} = 1 \Rightarrow \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 & \text{幅值平衡条件，确定振荡幅度} \\ \varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi & \text{相位平衡条件，确定频率 } \omega_{osc} \end{cases}$$



硬激励特性



4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

(3) 工作原理

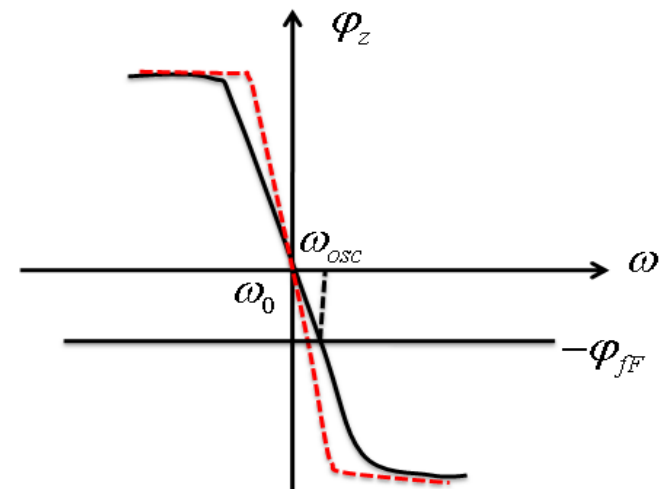
$$\varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad \text{相位平衡条件, 确定频率 } \omega_{osc}$$

$$\varphi_T(\omega) = \varphi_A(\omega) + \varphi_F(\omega) = \varphi_f(\omega) + \varphi_z(\omega) + \varphi_F(\omega) = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_f(\omega) - \text{基本放大器A有源器件的正向传输延迟} \\ \varphi_z(\omega) - \text{谐振回路的相位, 相对 } \varphi_f(\omega) \text{ 和 } \varphi_F(\omega) \text{ 而言, } \varphi_z(\omega) \text{ 对频率高度敏感。} \\ \varphi_z(\omega) = -[\varphi_f(\omega) + \varphi_F(\omega)] = -\varphi_{fF}(\omega) \end{array} \right.$$

可看成不变

ω_{osc} 实际并不严格等于 ω_0 (谐振回路振荡频率), 若 $|\varphi_{fF}|$ 足够小, 谐振回路 Q_T 足够高, ω_{osc} 与 ω_0 接近, 工程上认为二者相等。





4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

(3) 工作原理

稳幅原理：

①非线性振荡器。

反馈网络为线性网络，自动限幅由基本放大器完成：随着振荡的建立，基本放大器由刚起振时的小信号工作状态过度到大信号工作状态，由第二章分析可知，放大器的跨导或电压增益单调下降，限制了幅度的增长，即非线性器件都有固有的限幅作用。

②线性振荡器。

基本放大器处于线性状态，反馈为非线性。在反馈网络中引入对信号幅度敏感的非线性元件，如热敏电阻，使信号幅度增大时，自动减小正反馈量。反之，幅度信号减小时，增加正反馈量，从而达到限幅和稳幅的目的。



4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

(3) 工作原理

稳定条件： 电路必须具有抗御外界干扰，保证电路的平衡状态不会因干扰而被破坏的能力。

① 稳幅

a. 假设 $U_i^\uparrow, T^\uparrow \rightarrow U_f = T^\uparrow U_i^\uparrow = U_{i,next}^{\uparrow\uparrow}$ 不稳定

b. 假设 $U_i^\uparrow, T^\downarrow \rightarrow U_f = T^\downarrow U_i^\uparrow$ 有可能稳定

$\left. \frac{\partial T}{\partial U_i} \right|_{T=1} < 0$, 即二者变化方向相反 $\left| \frac{\partial T}{\partial U_i} \right|$ 越大, 幅度稳定性越好

$$\because T = AF \quad \therefore \frac{\partial T}{\partial U_i} = A \frac{\partial F}{\partial U_i} + F \frac{\partial A}{\partial U_i} < 0 \quad \text{幅度稳定条件}$$

非线性振荡器
(线性反馈网络, F为常数)

$$\frac{\partial T}{\partial U_i} = F \frac{\partial A}{\partial U_i} < 0, \quad \text{即} \frac{\partial A}{\partial U_i} < 0, \quad \text{或} \frac{\partial G_{m1}(U_i)}{\partial U_i} < 0$$

用非线性有源器件构成的放大器都具有天然的稳幅能力

线性振荡器
(A为常数)

$$\frac{\partial F}{\partial U_i} < 0, \text{由反馈网络完成}$$



4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

(3) 工作原理

$$\varphi_T(\omega) = \varphi_A(\omega) + \varphi_F(\omega) = 0$$

② 稳频

$$\omega_{osc} \uparrow \rightarrow \begin{cases} \varphi_T \uparrow \rightarrow \dot{X}_f \text{ 超前 } \dot{X}_i \text{ (输出端给输入端补充能量的周期越来越短)} \\ \rightarrow \omega_{osc} \uparrow \uparrow \text{ 不稳定} \\ \varphi_T \downarrow \rightarrow \dot{X}_f \text{ 滞后 } \dot{X}_i \quad \text{可能稳定} \end{cases}$$

相位稳定条件 $\left. \frac{\partial \varphi_T}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_{osc}} < 0$ $\left| \left. \frac{\partial \varphi_T}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_{osc}} \right|$ 越大，频率稳定性越好。

即只有环路相位特性 $\varphi_T(\omega)$ 在 $\omega = \omega_{osc}$ 处有负斜率的振荡器才是频率稳定的。

以RLC并联谐振回路
作定时网络

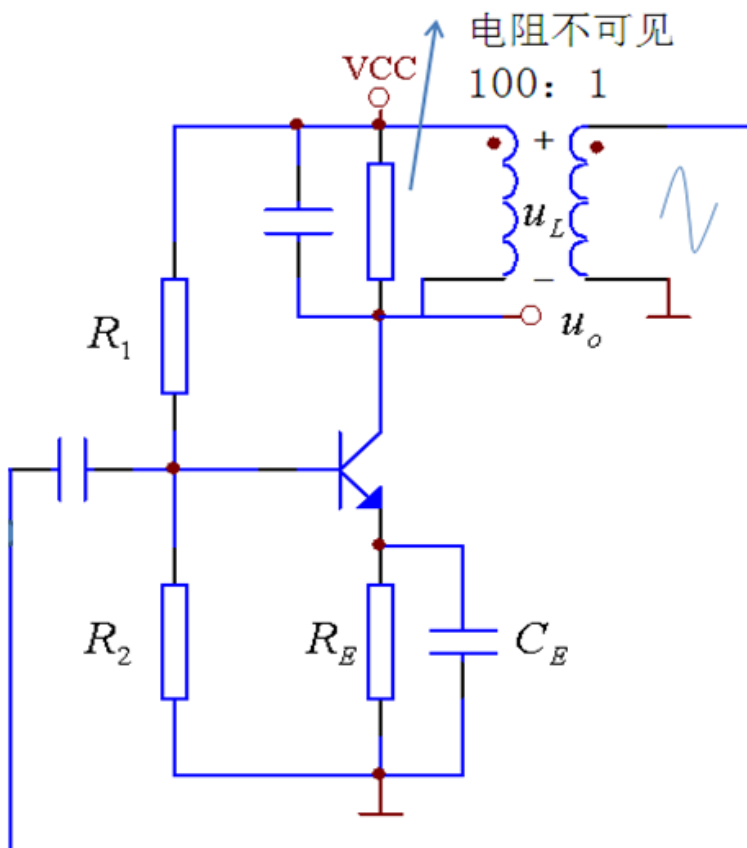
$$\varphi_T(\omega) = \varphi_z(\omega) + \varphi_{ff}(\omega), \varphi_z(\omega) \text{ 对 } \omega \text{ 敏感}$$

$$\frac{\partial \varphi_T}{\partial \omega} \approx \frac{\partial \varphi_z}{\partial \omega} \approx -\frac{2Q_T}{\omega_0} < 0$$

LC振荡器具有天然稳频能力， Q_T 越高，稳频性能越好，因此，设计振荡电路总要千方百计提高有载 Q_T 。

4.1 反馈型正弦振荡器基本原理

(4) 正弦振荡器分析步骤



1. 判断电路有无错误；
2. 画直流电路，计算 I_{CQ} 和 g_{mQ} ；
3. 画交流等效电路，判断相位平衡条件和幅度平衡条件；
4. 计算 f_{osc} 和 U_{osc} 。