

第4章 正弦波振荡器

- 4.1 反馈振荡器的原理
- 4.2 LC 振荡器
- 4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度
- 4.4 石英晶体振荡器

概述

在电子线路中，除了要对各种电信号进行放大的电子线路外，还需要有能在没有激励信号的情况下产生周期性振荡的电子线路——**振荡器**

与放大器一样，振荡器也是一种能量转换器。但振荡器**无需外部激励**就能自动的将直流电源供给的功率转换为指定功率和振幅的交流信号输出。振荡器一般由**晶体管**和**具有某种选频能力的无源网络**组成。

概述

1. 分类

- ① 根据工作原理分：反馈型振荡器 和 负阻型振荡器
正阻——消耗能量； 负阻——产生能量
- ② 根据所产生的波形：正弦波振荡器； 非正弦波振荡器
(矩形脉冲，三角波，锯齿波)
- ③ 根据选频网络所采用的器件：LC 振荡器，晶体振荡器（用于高频）；RC 振荡器（用于低频）

概述

2. 振荡器与放大器的异同：

共同点： 直流功率→交流功率

不同点： 放大器——他激； 振荡器——自激

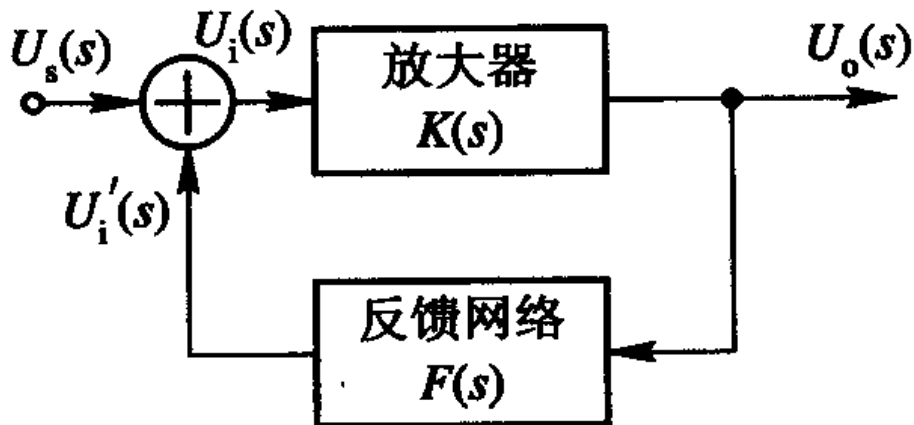
3. 应用

电讯、广播、通讯、测量、雷达、自控遥测、仪器等

4.1 反馈振荡器的原理

一、反馈振荡器的原理分析

1. 反馈型振荡器的原理框图



4-1 反馈性振荡器的原理框图

反馈型振荡器是由**放大器**和**反馈网络**组成的一个闭合环路，

放大器通常是以某种**选频网络**（如**振荡回路**）作**负载**，是一调

谐放大器，反馈网络一般是由无源器件组成的线性网络。

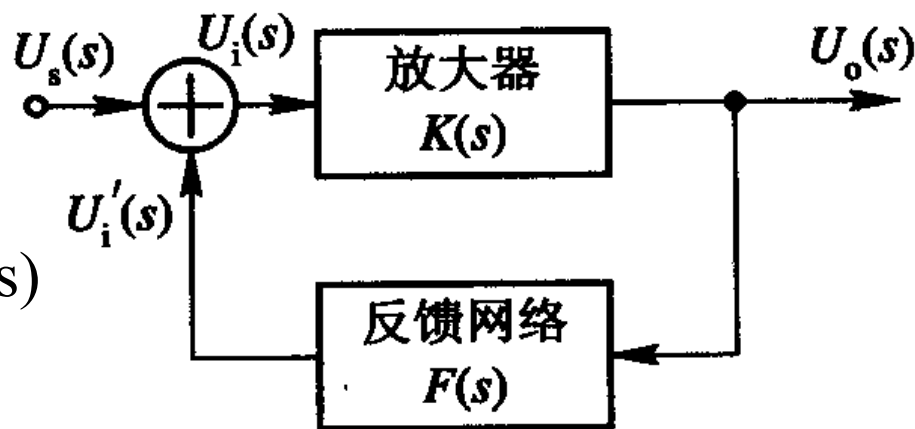
4.1 反馈振荡器的原理

一、反馈振荡器的原理分析

2. 原理分析

设闭环电路放大倍数为： $K_u(s)$

$$\text{则： } K_u(s) = \frac{U_o(s)}{U_s(s)}$$



4-1 反馈性振荡器的原理框图

$$\text{又： } K(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} \quad ; \quad F(s) = \frac{U_i'(s)}{U_o(s)} ; U_i(s) = U_s(s) + U_i'(s)$$

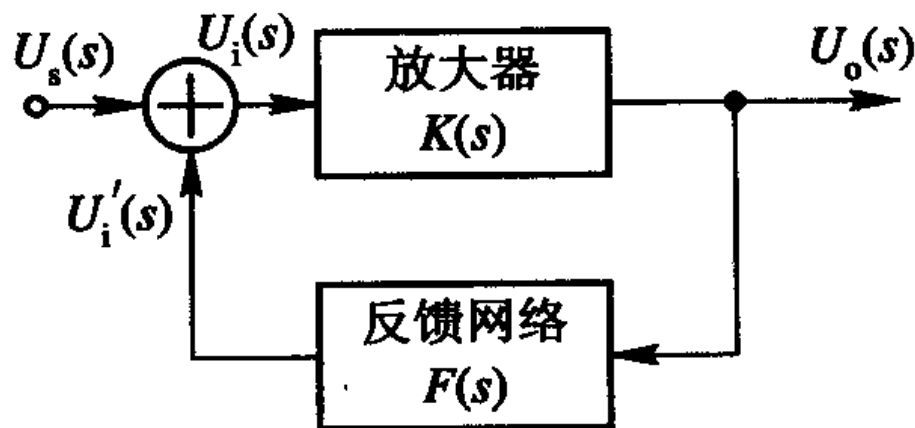
$$\begin{aligned} \longrightarrow K_u(s) &= \frac{U_o(s)}{U_i(s)} \cdot \frac{U_i(s)}{U_s(s)} = K(s) \frac{U_i(s)}{U_i(s) - U_i'(s)} = \frac{K(s)}{1 - U_i'(s)/U_i(s)} \\ &= \frac{K(s)}{1 - K(s)F(s)} = \frac{K(s)}{1 - T(s)} \end{aligned}$$

4.1 反馈振荡器的原理

一、反馈振荡器的原理分析

2. 原理分析

$$K_u(s) = \frac{K(s)}{1 - T(s)}$$



4-1 反馈性振荡器的原理框图

其中 $T(s) = K(s)F(s) = \frac{U_i'(s)}{U_i(s)}$ 称为反馈系统的环路增益

令 $s \rightarrow j\omega$, 则: $K_u(j\omega) = \frac{K(j\omega)}{1 - T(j\omega)}$

4.1 反馈振荡器的原理

一、反馈振荡器的原理分析

2. 原理分析

讨论：①：当 $T(j\omega) = 1$ 即： $T(j\omega) = \frac{U_o(j\omega)}{U_i(j\omega)} = 1$

$$K_u(j\omega) \square \square$$

此时即使没有外加信号，也有振荡输出。

② 当 $|T(j\omega)| < 1$ 时， $|U_o(s)| < |U_i(s)|$

振荡器为减幅振荡

③ 当 $|T(j\omega)| > 1$ 时， $|U_o(s)| > |U_i(s)|$

振荡器为增幅振荡

4.1 反馈振荡器的原理

二、振荡器的平衡条件

由前面的分析可知，当 $T(j\omega)=1$ 时， $K_u(j\omega)$ ☐ ☐

这就表明，即使没有外加信号，也可以维持震荡输出。故自激振荡的条件为：

$$T(j\omega) = K(j\omega)F(j\omega) = 1 \quad \text{—— 振荡器平衡条件}$$

即： ☐ $|T(j\omega)| = KF = 1$ 振幅平衡条件

☐ $\varphi_T = \varphi_K + \varphi_F = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2$ 相位平衡条件

4.1 反馈振荡器的原理

二、振荡器的平衡条件

- ① 在平衡状态中，电源供给的能量正好抵消整个环路损耗的能量，平衡时，输出幅度将不再变化，因此**振幅平衡条件决定了振荡器输出振幅大小**。
- ② 环路只有在某一特定频率上才能满足相位平衡条件，即**相位平衡条件决定了振荡器输出信号频率的大小**。

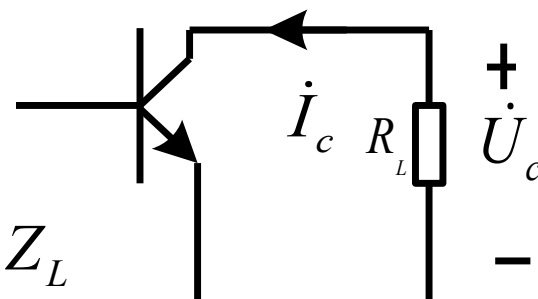
4.1 反馈振荡器的原理

二、振荡器的平衡条件

以单调谐谐振放大器为例来看 $K(j\omega)$ 与 $F(j\omega)$ 的意义：

令 $\dot{U}_o = \dot{U}_c, \dot{U}_i = \dot{U}_b$ ，则：

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_c}{\dot{U}_b} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_b} \frac{\dot{U}_c}{\dot{I}_c} = -Y_f(j\omega)Z_L$$



Z_L 为放大器的负载阻抗：
$$Z_L = -\frac{\dot{U}_c}{\dot{I}_c} = R_L e^{j\varphi_L}$$

$Y_f(j\omega)$ 为晶体管的正向转移导纳。

$$Y_f(j\omega) = \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_b} = Y_f e^{j\varphi_f}$$

4.1 反馈振荡器的原理

二、振荡器的平衡条件

$$K(j\omega) = -Y_f(j\omega)Z_L \quad Z_L = R_L e^{j\varphi_L} \quad Y_f(j\omega) = Y_f e^{j\varphi_f}$$

设与 $F(j\omega)$ 反号的反馈系数为 $F'(j\omega)$ ，即

$$F'(j\omega) = F' e^{j\varphi_{F'}} = -F(j\omega) = -\frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_c}$$

则

$$\begin{aligned} T(j\omega) &= -Y_f(j\omega)Z_L F(j\omega) = Y_f(j\omega)Z_L F'(j\omega) \\ &= Y_f R_L F' e^{j(\varphi_f + \varphi_{F'} + \varphi_L)} = 1 \end{aligned}$$

振幅平衡条件和相位平衡条件分别可写为

$$Y_f R_L F' = 1$$

$$\varphi_f + \varphi_L + \varphi_{F'} = 2n\pi$$

$$\varphi_f + \varphi_L + \varphi_{F'} = 2n\pi$$

$$n = 0, 1, 2 \quad \blacklozenge \blacklozenge \blacklozenge$$

4.1 反馈振荡器的原理

三、起振条件

振荡器在实际应用时，不应有外加信号 $U_s(s)$ ，应当是振荡器一加上电后即产生输出，那么初始的激励从哪里来？？？？

振荡器的最初来源是振荡器在接通电源时不可避免地存在的电冲击及各种热噪声等。

如：在加电时，晶体管电流由零突然增加，突变的电流包含有很宽的频谱分量，在他们通过负载回路时，只有频率等于回路谐振频率的分量可以产生较大的输出电压，而其他频率成分不会产生压降，因此负载回路上产生的压降频率

为回路的谐振频率。该压降通过反馈网络产生出较大的正反馈电压，反馈电压又加到放大器的输入端，再进行放大，反馈，不断地循环。

4.1 反馈振荡器的原理

三、起振条件

为了使振荡过程中输出幅度不断增加，应使反馈回来的信号比输入到放大器的大，即振荡开始时，应为增幅振荡，则

$$T(j\omega) > 1$$

起振条件为：

$$|T(j\omega)| = Y_f R_L F > 1$$

起振的振幅条件

$$\varphi_T = \varphi_f + \varphi_L + \varphi_F = 2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

起振的相位条件

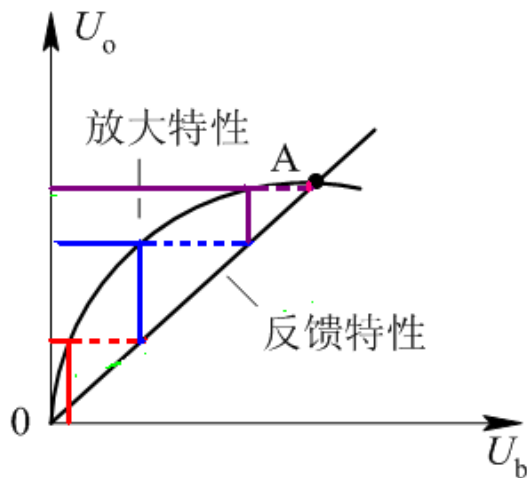
起振的相位条件也是正反馈条件

4.1 反馈振荡器的原理

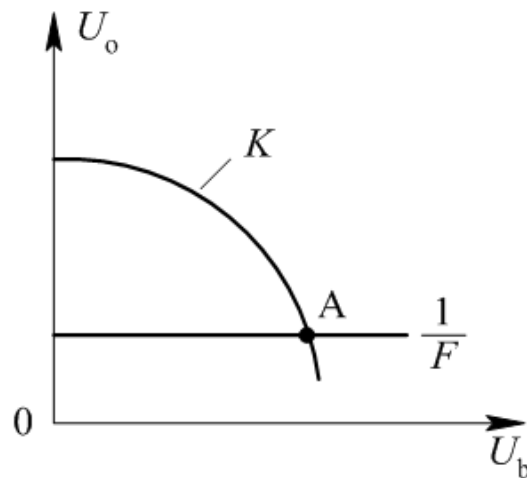
三、起振条件

振荡器由增幅振荡过渡到稳幅震荡的过程：

- ① 信号较小时，晶体管工作在线性放大区，放大器的输出随输入的增加而线性增加
- ② 信号增大到一定值时，晶体管工作在非线性放大区，此时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，当 $T(j\omega) = 1$ 时，震荡器达到平衡状态。



(a)



(b)

4.1 反馈振荡器的原理

四、稳定条件

振荡器在工作过程中不可避免的要受到外界各种因素的影响，如温度改变，电源电压的波动等，这些波动将使放大器放大倍数和反馈系数改变，破坏了原来的平衡状态，对振荡器的正常工作将会产生影响。

如果通过放大和反馈的不断循环，振荡器能在原平衡点附件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**。

稳定条件 {
 振幅稳定条件
 相位稳定条件

4.1 反馈振荡器的原理

四、稳定条件

① 振幅稳定条件

要使振幅稳定，振荡器在其平衡点必须具有阻止振幅变化的能力。

在平衡点附件，当不稳定因素使振幅增大时，环路增益的模值应该减小，形成减幅振荡，从而阻止振幅的增大，达到新的平衡。

反之，当不稳定因素使振幅减小时，环路增益的模值应该

增大，形成增幅振荡，从而阻止振幅的减小，达到新的平

衡。

4.1 反馈振荡器的原理

四、稳定条件

① 振幅稳定条件

振幅稳定条件为：

$$\frac{\partial T}{\partial U_i} \bigg|_{U_i=U_{iA}} < 0$$

反馈网络为线性网络，即反馈系数 F 大小不随输入信号改变，故振幅稳定条件也可写为：

$$\frac{\partial K}{\partial U_i} \bigg|_{U_i=U_{iA}} < 0$$

4.1 反馈振荡器的原理

四、稳定条件

② 相位稳定条件

设振荡器原在 $\omega = \omega_1$ 处处于平衡状态，即有：

$$\varphi = \varphi_L(\omega_1) + \varphi_f + \varphi_{F'} = 0$$

设有外因使反馈电压 $U_{b'}$ 的相位超前与原输入信号 U_b ，即此时 $\varphi > 0$ ， $\uparrow \rightarrow f \uparrow$ ，即频率提高，假设提高到 ω_2 ，则此时不满足平衡条件。

此时 $\varphi_f + \varphi_{F'}$ 不变，要满足平衡条件，应使 $\varphi_L + \varphi_f + \varphi_{F'} = 0$ ，即

$U_{b'}$ 相位落后于 U_b ， $\downarrow \rightarrow f \downarrow$ ，使频率恢复到原来的频率 ω 。

相位稳定条件：

$$\left. \frac{\partial \varphi_L}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_1} < 0$$

4.1 反馈振荡器的原理

四、稳定条件

② 相位稳定条件

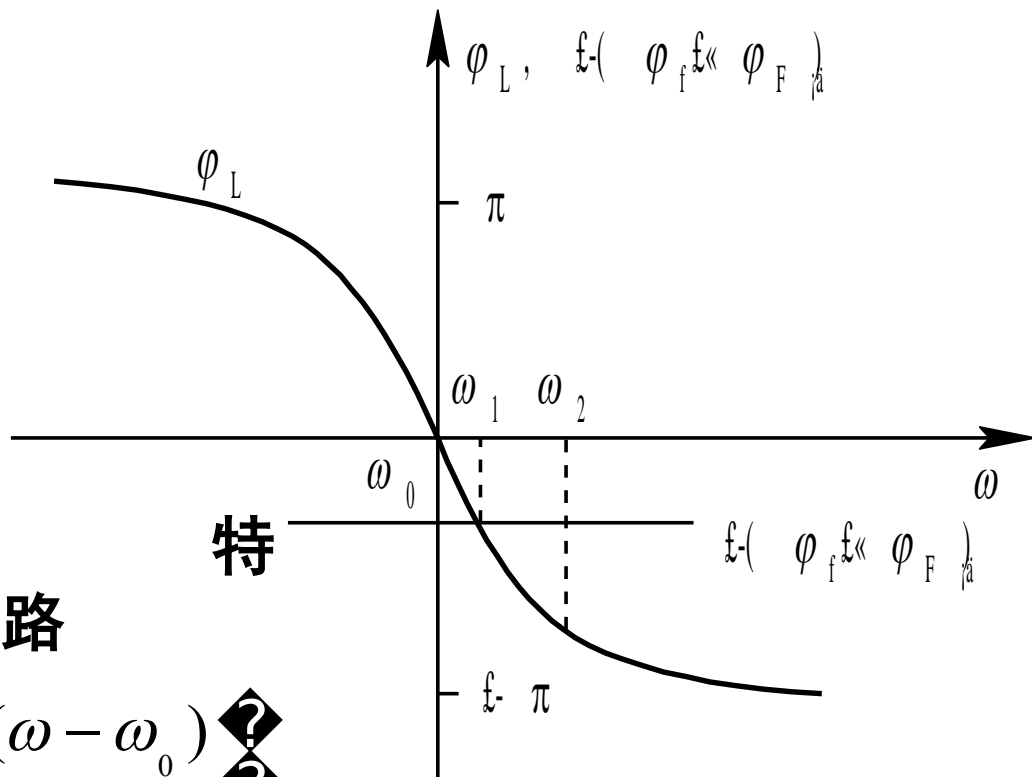
相位稳定条件：

$$\frac{\partial \varphi_L}{\partial \omega} \bigg|_{\omega=\omega_1} < 0$$

在 LC 振荡器中， $\varphi_T(\omega)$ 特性主要由并联谐振回路

特性决定：

$$\varphi_L(\omega) = -tg^{-1} \frac{Q_e(\omega - \omega_0)}{\omega_0}$$



4.1 反馈振荡器的原理

四、稳定条件

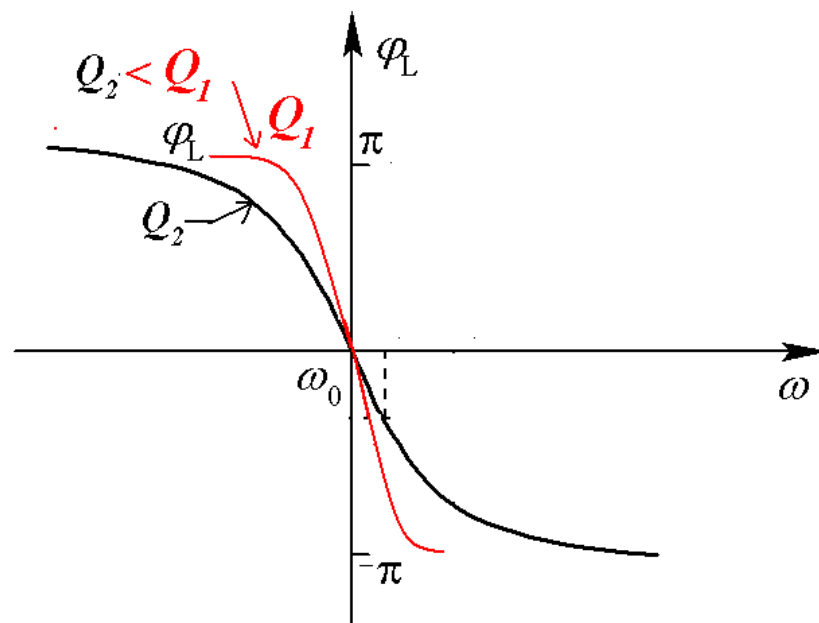
② 相位稳定条件

$$\varphi_L(\omega) = -\tan^{-1} \frac{Q_e(\omega - \omega_0)}{\omega_0}$$

显然在 ω_0 附近均满足

$$\frac{\partial \varphi_L}{\partial \omega} < 0$$

Q 越大, $\rightarrow \frac{\partial \varphi_L}{\partial \omega}$ 越大 \rightarrow 稳定性越好

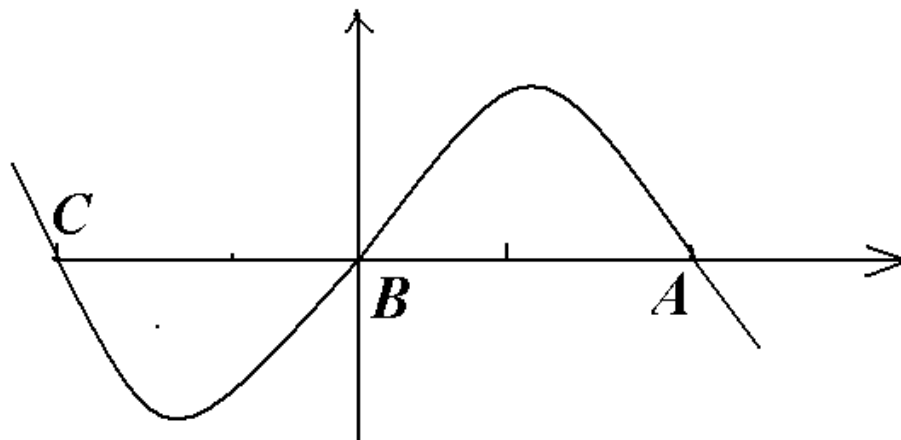


4.1 反馈振荡器的原理

四、稳定条件

② 相位稳定条件

注：在**一些**双调谐回路中，有时的相频特性如图所示，显然此时 B 为不稳定平衡点，A，C 为稳定平衡点。



反馈振荡器产生持续震荡满足：

- 起振条件
- 平衡条件
- 稳定条件

→ 三者缺一不可

4.1 反馈振荡器的原理

五、振荡线路举例——互感耦合振荡器

反馈网络由 L 和 L_1 间的互感 M 担任，因而称为互感耦合式的反馈振荡器，或称为变压器耦合振荡器。

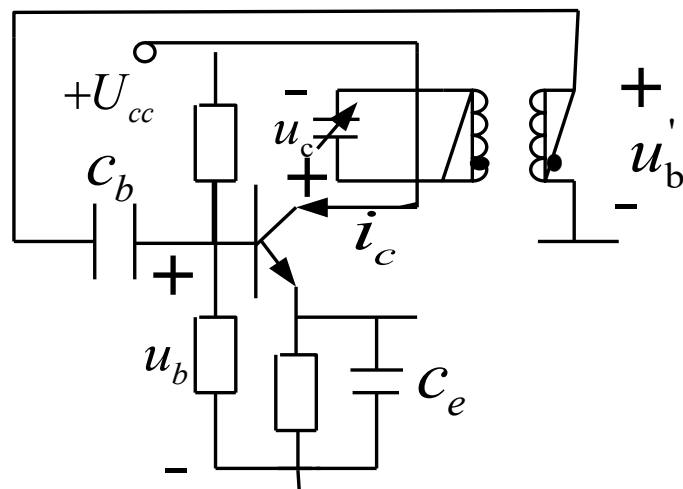
由三极管电流关系可知：

U_b 与 U_c 反向

又根据同名端可知：

U_b 与 U_b' 同相

→ 反馈为正反馈



互感耦合振荡器