



第2章选频网络与阻抗变换网络

□ 内容概要

- 高频电路中的元器件
- LC谐振网络
- 窄带无源阻抗变换网络
- 耦合回路
- 滤波器的其他形式

一、耦合回路概述

□ 单谐振回路的局限：

单谐振回路具有频率选择性和阻抗变换的作用。

但是：1、选频特性不够理想

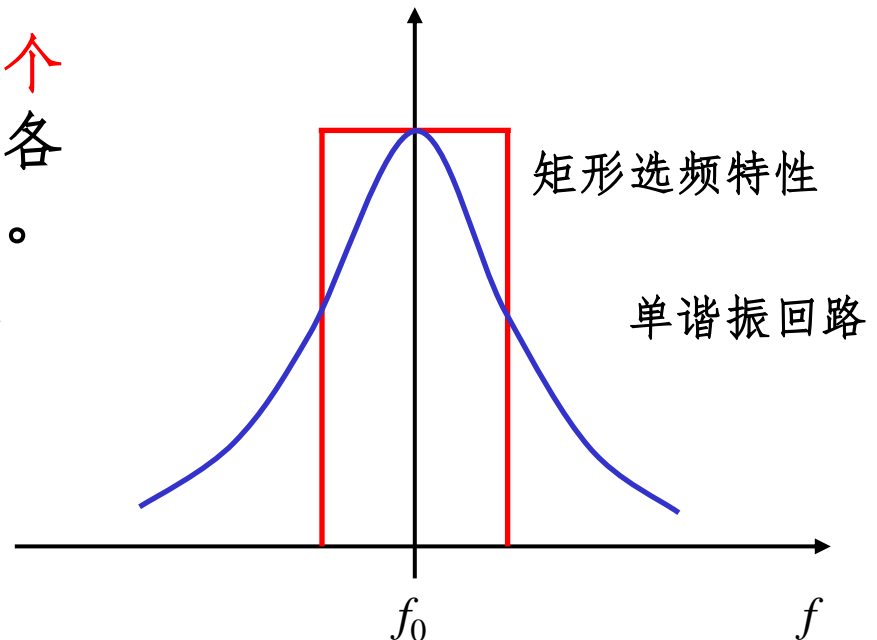
2、阻抗变换不灵活、不方便

□ 耦合回路的必要性：

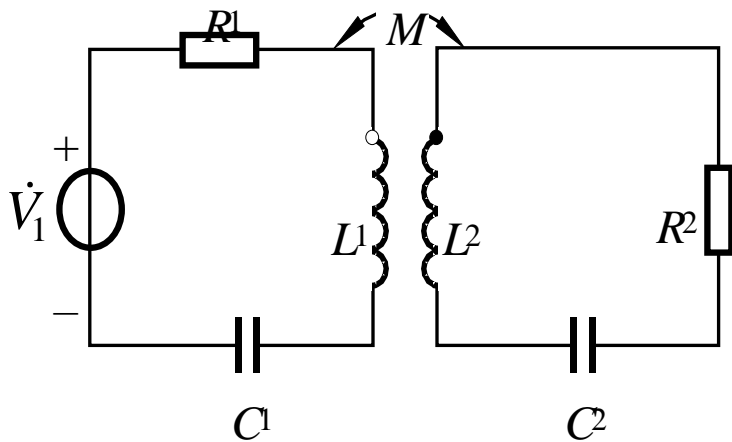
□ 耦合回路由两个或者两个以上的单谐振回路通过各种不同的耦合方式组成。

□ 耦合回路可以具有更好的选频特性

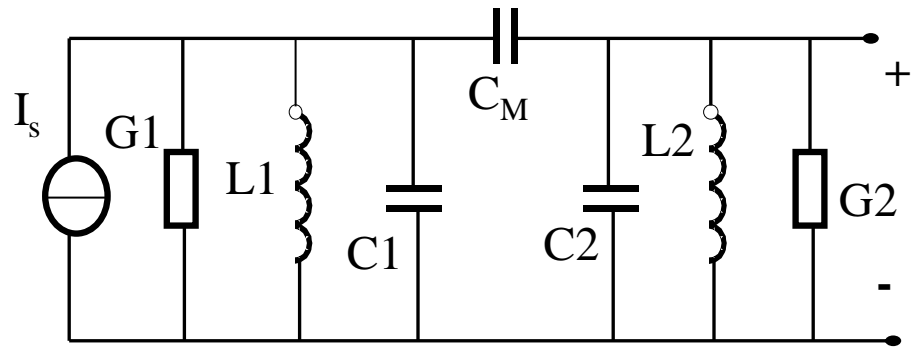
□ 耦合回路可以更灵活地调节阻抗，满足阻抗变换的需要。



□ 常用的两种耦合回路：



电感耦合串联型回路



电容耦合并联型回路

耦合回路的特性和功能与两个回路的耦合程度有关

按耦合参量的大小：强耦合、弱耦合、临界耦合



□ 耦合系数:

定义: 耦合回路中公共阻抗(串联)/导纳(并联)绝对值与初级回路中同性质的阻抗/导纳绝对值的几何平均值之比。

对电容耦合并联回路:
$$k = \frac{C_M}{\sqrt{(C_1 + C_M)(C_2 + C_M)}}$$

一般 $C_1 = C_2 = C$:

$$k = \frac{C_M}{C + C_M}$$

通常 $C_M \ll C$:

$$k \approx \frac{C_M}{C} \quad k < 1$$

对电感耦合串联回路:
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

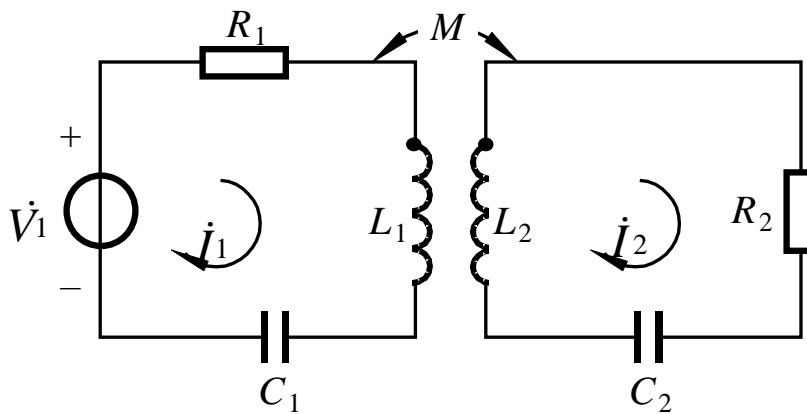
若 $L_1 = L_2 = L$

$$k = \frac{M}{L}$$



二、反射阻抗与耦合回路的等效阻抗

□ 耦合回路的电路分析：



以互感耦合串联回路为例来分析耦合回路的阻抗特性：

初、次级回路电压方程可写为

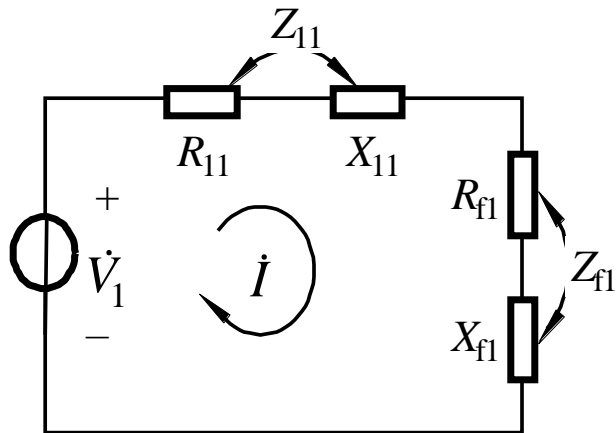
$$\begin{aligned} \dot{I}_1 Z_{11} - j\omega M \dot{I}_2 &= \dot{V}_1 \\ -j\omega M \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned}$$

Z_{11} 为初级回路的自阻抗，即 $Z_{11} = R_{11} + jX_{11}$ ，
 Z_{22} 为次级回路的自阻抗，即 $Z_{22} = R_{22} + jX_{22}$ 。

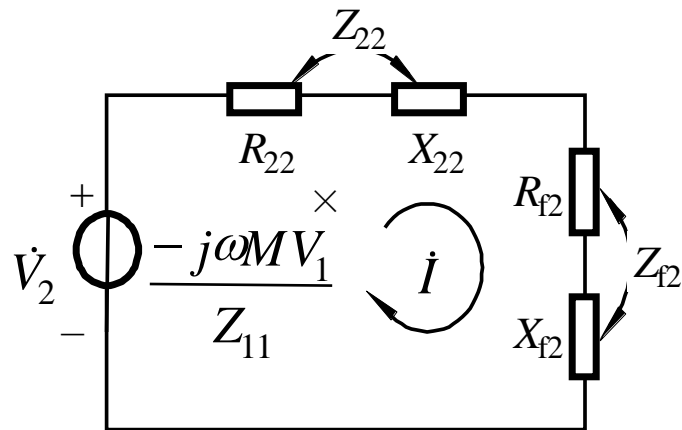
解上列方程组可分别求出初级和次级回路电流的表示式：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{Z_{11} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{22}}}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-j\omega M \frac{\dot{V}_1}{Z_{11}}}{Z_{22} + \frac{(\omega M)^2}{Z_{11}}}$$



(a) 初级等效电路



(b) 次级等效电路



□ 感应电动势:

次级开路时, 初级电流 $\dot{I}_1' = \frac{\dot{V}_1}{Z_{11}}$ 在次级线圈 L_2 中所感应的电动势用电压表示为

$$\dot{V}_2 = -j\omega M \dot{I}_1' = -j\omega M \frac{\dot{V}_1}{Z_{11}}$$

□ 反射阻抗:

反射阻抗是用来说明一个回路对耦合的另一回路电流的影响。初次级回路的相互影响, 可用一对反射阻抗表示。

$$Z_{f1} = \frac{(\omega M)^2}{Z_{22}} \text{ 称为次级回路对初级回路的反射阻抗}$$

$$Z_{f2} = \frac{(\omega M)^2}{Z_{11}} \text{ 称为初级回路对次级回路的反射阻抗}$$



将自阻抗 Z_{22} 和 Z_{11} 各分解为电阻分量和电抗分量，分别代入上式，得到初级和次级反射阻抗表示式为

$$Z_{f1} = \frac{(\omega M)^2}{R_{22} + jX_{22}} = \frac{(\omega M)^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} + j \frac{-(\omega M)^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} = R_{f1} + jX_{f1}$$

$$R_{f1} = \frac{(\omega M)^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} \quad X_{f1} = \frac{-(\omega M)^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22}$$

$$Z_{f2} = \frac{(\omega M)^2}{R_{11} + jX_{11}} = \frac{(\omega M)^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} R_{11} + j \frac{-(\omega M)^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} = R_{f2} + jX_{f2}$$

$$R_{f2} = \frac{(\omega M)^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} R_{11} \quad X_{f2} = \frac{-(\omega M)^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11}$$



□ 反射阻抗的性质：

- **反射电阻永远是正值。**这是因为，无论是初级回路反射到次级回路，还是从次级回路反射到初级回路，反射电阻总是代表一定能量的损耗。
- **反射电抗的性质与原回路总电抗的性质总是相反的。**
以 X_{f1} 为例，当 X_{22} 呈感性($X_{22}>0$)时，则 X_{f1} 呈容($X_{f1}<0$)；反之，当 X_{22} 呈容性($X_{22}<0$)时，则 X_{f1} 呈感性($X_{f1}>0$)。
- **反射电阻和反射电抗的值与耦合阻抗的平方值 $(\omega M)^2$ 成正比。**当互感量 $M=0$ 时，反射阻抗也等于零。这就是单回路的情况。
- **当初、次级回路同时调谐到与激励频率谐振（即 $X_{11}=X_{22}=0$ ）时，反射阻抗为纯阻。**作用相当于在初级回路中增加一电阻分量 $\frac{(\omega M)^2}{R_{22}}$ ，且反射电阻与原回路电阻成反比。



□ 耦合回路的等效阻抗：

考虑到反射阻抗对初、次级回路的影响，最后可以写出初、次级等效电路的总阻抗的表示式：

$$Z_{e1} = \left[R_{11} + \frac{(\omega M)^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} R_{22} \right] + j \left[X_{11} - \frac{(\omega M)^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2} X_{22} \right]$$

$$Z_{e2} = \left[R_{22} + \frac{(\omega M)^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} R_{11} \right] + j \left[X_{22} - \frac{(\omega M)^2}{R_{11}^2 + X_{11}^2} X_{11} \right]$$

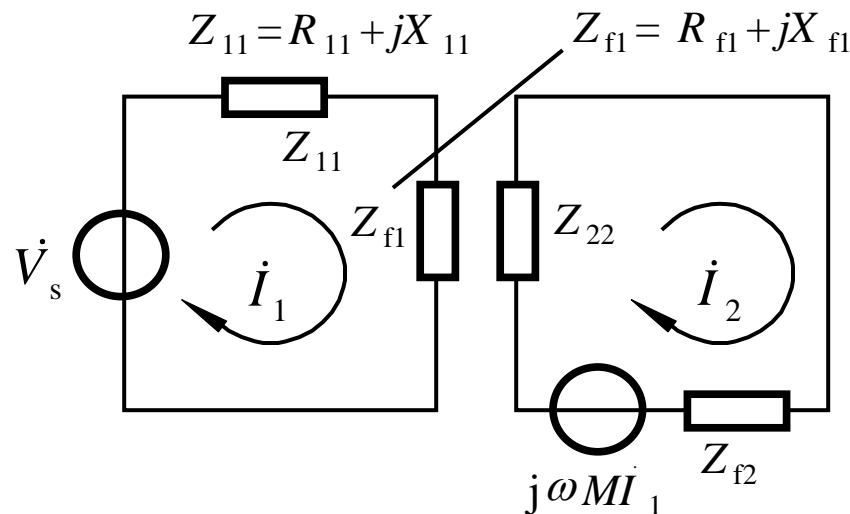
以上分析尽管是以互感耦合串联型回路为例，但推导过程和所得结论与电容耦合并联型回路的相似。

电容耦合回路分析推导：
课后作业！

三、耦合回路的调谐

□ 耦合回路的谐振及调谐方法：

- 对于耦合回路，凡是达到了**初/次级等效电路的电抗为零**，或**初次级回路电抗同时为零**，都称为回路达到了**谐振**。
- 耦合回路的谐振现象比单谐振回路的复杂，根据调谐参数不同，可分为**部分谐振、复谐振、全谐振**三种情况。
- 耦合回路的调谐方法可以是**调节初级回路的电抗**，**调节次级回路的电抗及调节两回路间的耦合量**。





□ 部分谐振（初级回路）：

- 固定次级回路参数及耦合量不变，调节初级回路的电抗使初级回路达到 $x_{11} + x_{f1} = 0$ ，称初级回路达到部分谐振。
- 这时初级回路电抗与反射电抗互相抵消，初级回路电流达到最大值

$$I_{1\max} = \frac{V_s}{R_{11} + \frac{(\omega M)^2}{|z_{22}|^2} R_{22}}$$

初级回路在部分谐振时所达到的电流最大值，仅是在所规定的调谐条件下（规定次级回路参数及耦合量不变）达到的，并非回路可能达到的最大电流。



□ 部分谐振（次级回路）：

□ 固定初级回路参数及耦合量不变，调节次级回路电抗使 $x_{22} + x_{f2} = 0$ ，则次级回路达到部分谐振，次级回路电流达最大值

$$I_{2\max} = \frac{\omega M \frac{V_s}{|z_{11}|}}{R_{22} + R_{f2}} = \frac{\omega M V_s}{|z_{11}| \left[R_{22} + \frac{(\omega M)^2}{|z_{11}|^2} R_{11} \right]}$$

□ 这时次级电流的最大值并不等于初级回路部分谐振时次级电流的最大值。

次级回路在部分谐振时所达到的电流最大值，也并非回路可能达到的最大电流。

□ 复谐振:

- 在部分谐振的条件下，再改变互感量，使反射电阻 R_{f1} 等于回路本身电阻 R_{11} ，即满足最大功率传输条件，称之为复谐振。
- 这时初级电路不仅发生了谐振而且达到了匹配。
- 反射电阻 R_{f1} 将获得可能得到的最大功率，亦即次级回路将获得可能得到的最大功率，所以次级电流也达到可能达到的最大值

$$I_{2\max} = \frac{V_s}{2\sqrt{R_{11}R_{22}}}$$

注意，在复谐振时初级等效回路及次级等效回路都对信号源频率谐振，但单就初级回路或次级回路来说，并不对信号源频率谐振。这时两个回路或者都处于感性失谐，或者都处于容性失谐。



□ 全谐振:

- 调节初级回路的电抗及次级回路的电抗，使**两个回路都单独的达到与信号源频率谐振**，即 $x_{11} = 0$ ， $x_{22} = 0$ ，这时称耦合回路达到全谐振。
- 全谐振条件下，两个回路阻抗均呈**阻性**，即 $z_{11} = R_{11}$ ， $z_{22} = R_{22}$ 。
- 进一步改变M，使 $R_{11} = R_{f1}$ ， $R_{22} = R_{f2}$ ，满足**阻抗匹配条件**，则称为**最佳全谐振**。此时次级电流达到可能达到的最大值

$$I_{2\max} = \frac{V_s}{2\sqrt{R_{11}R_{22}}}$$

最佳全谐振时次级回路电流值与复谐振时相同。由于最佳全谐振既满足初级匹配条件，同时也满足次级匹配条件，所以最佳全谐振是复谐振的一个特例。



由最佳全谐振条件可得最佳全谐振时的互感为：

$$M_c = \frac{\sqrt{R_{11}R_{22}}}{\omega}$$

最佳全谐振时初、次级间的耦合称为临介耦合，与此相应的耦合系数称为临介耦合系数，以 k_c 表示。

$$k_c = \frac{M_c}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = \sqrt{\frac{R_{11}R_{22}}{\omega L_{11}\omega L_{22}}} \approx \frac{1}{\sqrt{Q_1Q_2}}$$

$Q_1 = Q_2 = Q$ 时

$$K_c = \frac{1}{Q}$$



我们把耦合谐振回路两回路的耦合系数与临界耦合系数之

比称为**耦合因数** $\eta = \frac{K}{K_c} = KQ$

η 是表示**耦合谐振回路耦合相对强弱**的一个重要参量。

$\eta < 1$ 称为**弱耦合**； $\eta = 1$ 为**临界耦合**； $\eta > 1$ 为**强耦合**。

各种耦合电路都可定义k，但是**只能对双谐振回路才可定义 η** 。



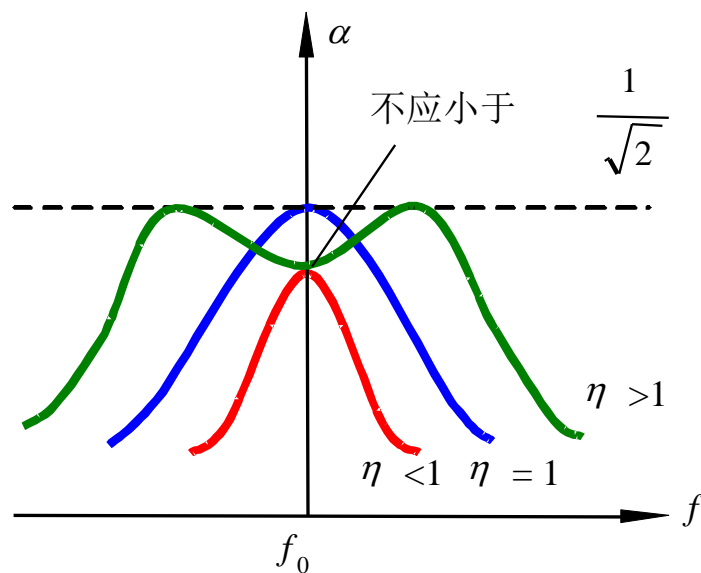
□ 耦合回路的频率特性：

当初、次级回路 $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$, $Q_1 = Q_2 = Q$ 时,
广义失调 $\xi_1 = \xi_2 = \xi$, 可以导出次级回路电流比:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_{2\max}} = \frac{2\eta}{\sqrt{(1 + \eta^2 - \xi^2)^2 + 4\xi^2}}$$

ξ 为广义失谐, η 为耦合因数, α 表示耦合回路的频率特性。

$\eta > 1$ 称为强耦合，谐振曲线出现双峰，谷值 $\alpha < 1$ ，
在 $\xi = \pm\sqrt{\eta^2 - 1}$ 处， $\mathbf{x}_{11} + \mathbf{x}_{f1} = 0$ ， $R_{f1} = R_{11}$ 回路达到匹配，
相当于复谐振，谐振曲线呈最大值， $\alpha = 1$ 。



$\eta < 1$ 称为弱耦合 若 $\xi = 0$ 时， $\alpha = \frac{2\eta}{1+\eta^2}$ 为最大值;

$\eta = 1$ 称为临介耦合 $\xi = 0$ 时， $\alpha = 1$ 为最大值;



□ 耦合回路的通频带:

根据前述单回路通频带的定义,

$$\text{当 } \alpha = \frac{I_2}{I_{2\max}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad Q_1 = Q_2 = Q, \quad \omega_{01} = \omega_{02} = \omega$$

时可导出

$$2\Delta f_{0.7} = \sqrt{\eta^2 + 2\eta - 1} \cdot \frac{f_0}{Q}$$

若 $\eta = 1$ 时,

$$2\Delta f_{0.7} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q}$$

临界耦合回路通频带是单回路的 $\sqrt{2}$ 倍。

一般采用 η 稍大于1, 这时在通带内放大均匀, 而在通带外衰减很大, 具有较理想的幅频特性。