

# 电路分析基础

下 册

中国人民解放军空军雷达学校

一九七八年八月

# 目 录

## 第五章 振荡电路

第一节 串联振荡电路.....	1
一、串联谐振的条件和特点.....	1
二、谐振时的能量关系.....	4
三、串联振荡电路的频率特性.....	6
四、串联振荡电路的通频带.....	11
*五、串联振荡电路的电压传输系数.....	13
第二节 并联振荡电路.....	16
一、并联谐振的条件和特点.....	16
二、并联振荡电路的等效电路.....	19
三、并联振荡电路的频率特性.....	21
四、复杂并联振荡电路.....	26
第三节 耦合振荡电路.....	34
一、互感耦合电路的等效电路.....	35
二、互感耦合电路的谐振.....	39
*三、互感耦合电路的频率特性.....	45
*四、互感耦合电路的通频带.....	50
五、电源和负载为并联的互感耦合电路.....	53
*六、耦合振荡电路的其他形式·耦合系数.....	54

## 第六章 四端网络

第一节 四端网络的基本方程和基本参数.....	59
一、四端网络的 $A$ 方程和 $A$ 参数.....	59
二、等效四端网络.....	67
三、四端网络的其他基本方程和基本参数.....	71
第二节 四端网络的特性参数.....	74
一、四端网络的输入、输出阻抗和实验参数.....	74

二、四端网络的特性阻抗	76
三、四端网络的固有传输常数	79
四、匹配链联网络	84
五、几种基本网络的特性参数	87
〔附录〕 双曲线函数公式	91
* 第三节 复合四端网络	92
一、矩阵初步	92
二、网络的串联	95
三、网络的并联	96
四、网络的链联	97
五、复合四端网络计算举例	99
* 第四节 $LC$ 滤波器	103
一、滤波器的基本工作概况	103
二、无损耗 $\Gamma$ 形滤波器的一般特性	105
三、 $K$ 式滤波器	109
四、 $m$ 式滤波器	121
* 第五节 衰减器	127
一、 $\Gamma$ 形衰减器	127
二、对称 $T$ 形衰减器	128
三、对称 $\pi$ 形衰减器	132
四、桥 $T$ 形衰减器	132
〔附录〕 电平的概念	133
* 第六节 几种实用 $RC$ 网络	135
一、电压传输函数	135
二、 $RC$ 移相网络	136
三、桥 $T$ 选频网络	137
四、桥 $T$ 形交流导前网络	139
五、双 $T$ 选频网络	141

## 第七章 电路中的过渡过程

第一节 换路定律	144
第二节 电阻电容串联电路中的过渡过程	146
一、 $RC$ 串联电路与直流电压接通	146
二、 $RC$ 串联电路的短接	149
三、电容器在非零初始条件下与直流电源接通·三要素法	151

* 四、 $RC$ 串联电路与正弦电压接通	159
第三节 电阻电感串联电路中的过渡过程	161
一、 $RL$ 串联电路与直流电压接通	161
二、 $RL$ 串联电路的短接	162
三、 $RL$ 串联电路的断开	166
* 四、 $RL$ 串联电路与正弦电压接通	168
第四节 电阻电感电容串联电路中的过渡过程	169
一、 $RLC$ 串联电路与直流电压接通	169
二、电容器通过 $RL$ 串联电路放电	177
* 三、 $RLC$ 串联电路与正弦电压接通	180
* 第五节 运算法	185
一、运算法的数学基础	185
二、电路基本定律的运算形式	195
三、用运算法计算过渡过程	198
* 第六节 应用杜阿密尔积分解过渡过程	209

## 第八章 磁路和变压器

第一节 磁场的基本概念和物理量	216
一、磁感应强度	216
二、磁通	217
三、导磁系数	218
四、磁场强度	218
第二节 磁路的基本定律	219
一、磁路的欧姆定律	219
二、磁路的基尔霍夫定律	220
第三节 直流激磁的磁路	223
一、铁磁材料的磁化曲线	223
二、磁路的计算方法	224
第四节 交流激磁的磁路	231
一、铁磁材料在交变磁化时的特点·磁滞回路	231
二、磁芯损失	233
三、波形畸变	238
四、铁芯线圈的等效电路	241
* 第五节 受控铁芯线圈	244
一、交流绕组中的电流有效值与控制电流的关系	244

二、小信号情况下交流线圈中电流有效值与控制电流的关系·····	245
三、应用举例·····	248
第六节 变压器·····	247
一、变压器的基本工作原理·理想变压器·····	248
二、实际变压器的电压电流关系和等效电路·····	250
三、变压器的矢量图·····	254
* 四、变压器分析方法与互感耦合电路一般分析方法的联系·····	256
第七节 常用磁性材料介绍·····	258
一、金属磁性材料·····	258
* 二、非金属磁性材料—铁氧体(铁淦氧)·····	261

## 第五章 振荡电路

在电子技术中，广泛采用由电感电容组成的振荡电路。它的形式主要有两种：一种是由电感电容组成的单回路，称为单振荡回路；另一种是由电感电容组成的双回路，称为耦合振荡回路。图5-1是单振荡回路的两种形式，其中图(a)为串联振荡回路，图(b)为并联振荡回路。

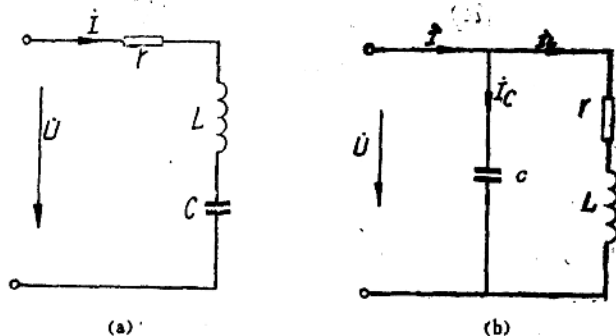


图5-1

振荡回路。耦合振荡回路有多种形式，互感耦合振荡回路是它的一种形式，如图5-2所示。

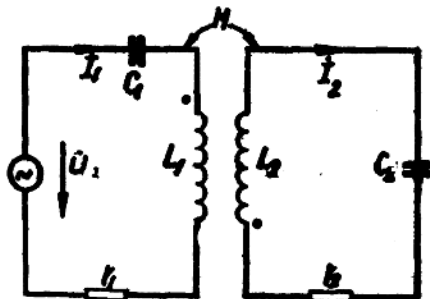


图5-2

振荡电路在电子技术中占有极重要的地位。例如，发射机要利用它和电子器件组成振荡器以产生高频交流电；接收机要利用它和电子器件组成输入电路及调谐放大器，用以选择一定频率的电信号并加以放大。本章研究串、并联振荡电路和互感耦合振荡电路，重点是这些电路的频率特性。

### 第一节 串联振荡电路

#### 一、串联谐振的条件和特点

在电阻、电感、电容串联电路中（见图5-1-1 a），如外加电源的角频率为 $\omega$ ，则电路的阻抗为

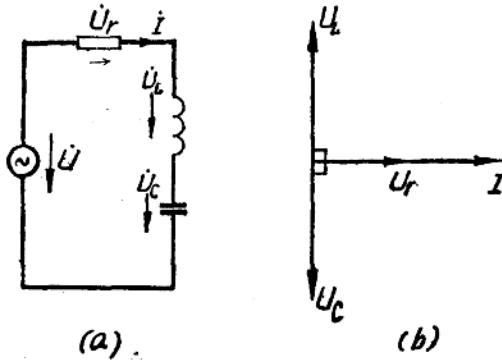


图5-1-1

$$Z = r + j(x_L - x_C)$$

$$= r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

输入电压与电流的相位关系为

$$\varphi = \arctg \frac{x_L - x_C}{r} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}$$

当  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  时,  $\varphi = 0$ , 外加电压和电流同相, 其矢量图如图 5-1-1 (b) 所示。

这种状态称为串联谐振。串联谐振的条件是

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\text{或 } x = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (5-1-1)$$

下面研究谐振频率  $f_0$  与电路参数的关系。我们用  $\omega_0$  表示谐振角频率, 则

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

$$\text{得 } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\text{或 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-1-2)$$

式中  $L$  的单位是亨,  $C$  的单位是法,  $f_0$  的单位是赫,  $\omega_0$  的单位是弧度/秒。

由 (5-1-2) 式可见, 谐振频率  $f_0$  由电路参数决定, 故又叫该电路的固有频率。要使电路谐振, 信号源的频率应等于回路的固有频率。当  $L$ 、 $C$  一定时, 改变信号源的频率  $f$ , 使之满足  $f = f_0$ , 电路就对信号源发生谐振; 当信号源频率一定时, 改变  $L$  或  $C$ , 即改变  $f_0$ , 使电路对信号源频率发生谐振, 这种调节过程, 称为调谐。当  $f_0 \neq f$ , 电路不谐振, 叫做失谐。失谐程度用  $\Delta f = f - f_0$  或  $\Delta \omega = \omega - \omega_0$  表示。 $\Delta f$  或  $\Delta \omega$  是频率偏离  $f_0$  ( $\omega_0$ ) 的数值, 简称频偏。

电路和信号源发生谐振, 是电路的一种特殊工作状态。下面研究在谐振状态下, 电路有

些什么特点。在叙述谐振特点时，我们用“0”来标注谐振状态，例如谐振电流用 $I_0$ ，谐振阻抗用 $Z_0$ ，谐振电抗用 $x_0$ ，等等。

1. 谐振时，电路的阻抗最小，

因为谐振时，电抗 $x = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$ ，所以

$$Z_0 = r + jx = r$$

$Z_0$ 的性质为电阻性。

2. 电路中的电流最大，并与电源电压同相，即

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}}{r}$$

3. 电阻上的电压等于总电压，电感电压 $\dot{U}_{L_0}$ 与电容电压 $\dot{U}_{C_0}$ 的大小相等，相位相反，它们的数值是电源电压的 $Q$ 倍。即

$$\dot{U}_r = \dot{I}_0 r = \dot{U}$$

$$\dot{U}_{L_0} = j\omega_0 L \dot{I}_0 = j \frac{\omega_0 L}{r} \dot{U} = j Q \dot{U}$$

$$\dot{U}_{C_0} = -j \frac{1}{\omega_0 C} \dot{I}_0 = -j \frac{1}{\omega_0 C} \cdot \frac{\dot{U}}{r} = -j Q \dot{U}$$

式中

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r}$$

即

$$U_{L_0} = U_{C_0} = QU \quad (5-1-3)$$

上式 $Q$ 为电路的品质因数，它同上册第二章所讲的线圈的 $Q$ 值的概念是一致的。不过，线圈的 $Q$ 值只考虑线圈本身的有效电阻，而电路的 $Q$ 值除考虑线圈的电阻之外，还要考虑电容器的损耗电阻和其它的附加电阻。

这里提一下谐振电路的特性阻抗概念。电路在谐振时的感抗或容抗，称为特性阻抗，用 $\rho$ 表示。

$$\left. \begin{aligned} \rho = x_{L_0} = \omega_0 L &= \sqrt{\frac{L}{C}} \\ \rho = x_{C_0} = \frac{1}{\omega_0 C} &= \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned} \right\} \quad (5-1-4)$$

于是 $Q$ 值与 $\rho$ 的关系为

$$Q = \frac{x_{L_0}}{r} = \frac{x_{C_0}}{r} = \frac{\rho}{r} \quad (5-1-5)$$

式(5-1-3)告诉我们，谐振时，电感两端电压或电容两端电压比信号源电压大，所以串联谐振又叫电压谐振。在电子线路中，回路 $Q$ 值一般在50~200之间，高质量回路的 $Q$ 值在200~500之间。谐振时，即使信号源电压很低，但回路元件上的电压可以达到很高，这对于信号电压的传输是有利的，相当于把信号电压放大了 $Q$ 倍。但有时又是不利的，例如电力系统中，由于谐振而造成电容器过压击穿事故，这是必须防备的。

**【例题】**一半导体收音机输入回路的电感 $L = 300 \mu H$ ，回路总等效电阻 $r = 10 \Omega$ ，当收听频率为540K C的电台时，输入信号为100  $\mu V$ ，求可变电容器的容量 $C$ ，电路的 $Q$ 值和从线圈上输出的电压为多少？



解： 由  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

可得电容器的容量应为

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L}$$

$$= \frac{1}{4\pi^2 \times (540 \times 10^3)^2 \times 300 \times 10^{-6}}$$

$$= 292 \times 10^{-12} F = 292 PF。$$

品质因数

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r}$$

$$= \frac{2\pi \times 540 \times 10^3 \times 300 \times 10^{-6}}{10}$$

$$= 106.8$$

在半导体收音机用磁性天线的输入电路中，通常是初级调谐，将线圈上的电压耦合到下一级，所以输出电压为

$$U_{L_0} = QU = 106.8 \times 100 \times 10^{-6}$$

$$= 10680 \times 10^{-6} V$$

$$= 10.68 mV$$

## 二、谐振时的能量关系

电路的Q值是描述电路谐振特性的重要参数。而电路的Q值与电路中的能量关系有着密切联系。这里就来分析谐振时的能量关系，从而说明Q值的物理意义。

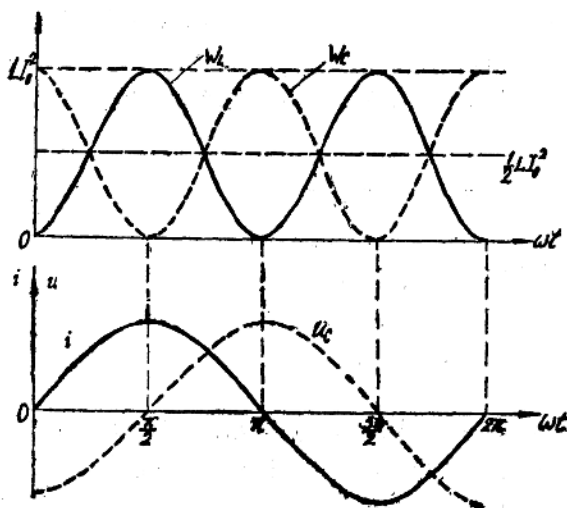


图6-1-2

设串联谐振时，回路中的电流为

$$i = \sqrt{2} I_0 \sin \omega_0 t$$

则电容上的电压为

$$u_c = \frac{\sqrt{2} I_0}{\omega_0 C} \sin(\omega_0 t - \pi/2) = -\frac{\sqrt{2} I_0}{\omega_0 C} \cos \omega_0 t$$

电容器储存的电能为

$$W_c = \frac{1}{2} C u_c^2 = \frac{1}{2} C \frac{2 I_0^2}{\omega_0^2 C^2} \cos^2 \omega_0 t$$

因为

$$\omega_0^2 C^2 = \frac{1}{\rho^2} = \frac{C}{L}, \text{ 代入到上式得}$$

$$W_c = L I_0^2 \cos^2 \omega_0 t = \frac{1}{2} L I_0^2 (1 + \cos 2\omega_0 t)$$

而线圈中储存的磁能为

$$W_L = \frac{1}{2} L i^2 = L I_0^2 \sin^2 \omega_0 t = \frac{1}{2} L I_0^2 (1 - \cos 2\omega_0 t)$$

电容与线圈储存的总能量为

$$W = W_c + W_L = L I_0^2$$

由上式可见, 虽然  $W_c$ 、 $W_L$  都是随时间而变化的, 但两者之和却是不随时间变化的。图 5-1-2 画出了  $i$ 、 $u_c$ 、 $W_c$ 、 $W_L$  随时间变化的曲线。

由图可见, 在第一个  $\frac{1}{4}$  周期内 (即  $0 \sim \frac{\pi}{2}$ ), 电场能量逐渐减小, 磁场能量逐渐增大, 电能逐渐转换为磁能。当电场能量减小到零时 (这时  $u_c = 0$ ), 磁场能量达到极大值 (这时  $i$  最大), 电能全部转换为磁能。在第二个  $\frac{1}{4}$  周期 ( $\frac{\pi}{2} \sim \pi$ ), 磁场能量逐渐减小, 电场能量逐渐增大, 磁能逐渐转换成电能, 当磁能减小到零时 (这时  $i = 0$ ), 电能达到极大值 ( $u_c$  为极大值), 磁能又全部转换成电能。以后的情况与此类似。总之, 在振荡电路中, 电能和磁能互相转换着, 而总的储能保持不变。

这时电源只供给电阻  $r$  上的能量损耗。一个周期  $T_0$  内, 电阻上消耗的电能为

$$W_T = P_0 T_0 = I_0^2 r T_0 = I_0^2 r \frac{2\pi}{\omega_0}$$

回路总储能  $W$  与电阻上一周期内消耗能量  $W_T$  的比值为

$$\frac{W}{W_T} = \frac{L I_0^2}{I_0^2 r \frac{2\pi}{\omega_0}} = \frac{\omega_0 L}{r} \cdot \frac{1}{2\pi} = \frac{Q}{2\pi}$$

或者写为

$$Q = 2\pi \frac{W}{W_T} = 2\pi \frac{\text{谐振时回路储存的总能量}}{\text{一周期内回路中消耗的能量}} \quad (5-1-6)$$

上式表明了  $Q$  值的物理意义。回路的储能越大, 而一个周期内损耗的能量越小, 则  $Q$  值越高。

了解谐振时的能量关系以后, 我们就可解释在谐振情况下, 电感电压或电容电压为什么会是电源电压的  $Q$  倍。由图 5-1-2 可知, 当电容吸收能量时, 电感放出能量, 当电容放出能量时, 电吸收能量, 而且  $W_c$  与  $W_L$  两者的最大值相等, 这说明能量在电容和线圈之间来回转换, 电源并不提供无功功率, 而只供给电阻损耗的能量。在振荡电路中,  $r$  总是很小的, 因此整个电路总是储能多, 而耗能少。由于  $L$ 、 $C$  中储能多, 所以  $u_L$ 、 $u_c$  很高, 都可以比外加电源电压高。

### 三、串联振荡电路的频率特性

所谓电路的频率特性，就是研究电路的阻抗和电流随信号源频率而变化的规律性。由于电路的频率特性对信号的传输质量有很大影响，因此研究电路的频率特性具有重要意义。

#### (一) 阻抗频率特性

阻抗频率特性是研究回路阻抗随频率变化的规律， $r-L-C$ 串联回路中，阻抗的表示式为

$$Z = r + j(x_L - x_C) = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + jx$$

阻抗的绝对值和阻抗角分别为

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5-1-7)$$

$$\varphi = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \quad (5-1-8)$$

根据式(5-1-7)、(5-1-8)可画出图5-1-3，其中图(a)为感抗 $x_L$ 、

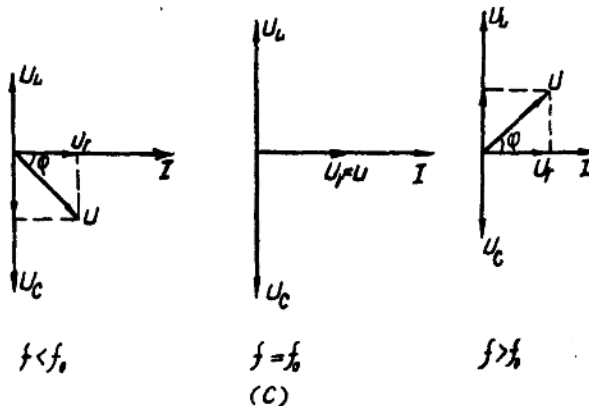
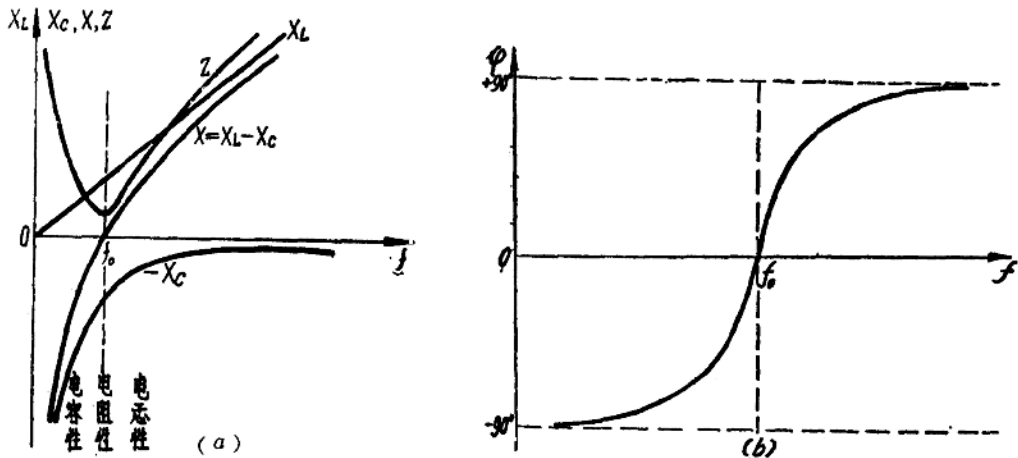


图5-1-3

容抗  $x_c$ 、总电抗  $x$  和总阻抗绝对值随频率变化的曲线，图 (b) 为阻抗角  $\varphi$  随频率变化的曲线，图 (c) 为矢量图。

当信号源频率  $f < f_0$  时， $x_L < x_C$ ， $U_L < U_C$ ，由矢量图可见，总电压滞后于电流，阻抗角为负值，回路的阻抗呈电容性，回路相当于  $r-C$  串联电路；

当信号源频率  $f > f_0$  时， $x_L > x_C$ ， $U_L > U_C$ ，由矢量图可见，总电压超前于电流，阻抗角为正值，回路的阻抗呈电感性，回路相当于  $r-L$  串联电路；

当  $f = f_0$  时， $x_L = x_C$ ， $U_L = U_C$ ，总电抗  $x = 0$ ，总阻抗为纯电阻性，总电压与电流同相。

## (二) 电流频率特性

在  $r$ 、 $L$ 、 $C$  串联回路中，谐振时电流最大，失谐时电流减小，因此回路电流随电源频率的改变而改变。电流的绝对值与电源频率的关系由下式确定：

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

如果电源电压  $U$  和元件参数不变，就可以画出电流随频率变化的曲线，如图 5-1-4 所示，此曲线称为电流谐振曲线。图中画出了回路电阻数值不同的电流频率曲线。由图可见，当电路对电源频率谐振（即  $\omega = \omega_0$ ）时，电流达到极大值；失谐时（ $\omega \neq \omega_0$ ），电流减小，失谐愈大（即离开谐振频率愈远），电流愈小。回路电阻愈小，则谐振时的电流愈大。在失谐很大时，几根曲线逐渐重合，说明电流几乎与电阻数值无关，这是由于在失谐很大时，电路中的电抗比电阻大得多的缘故。

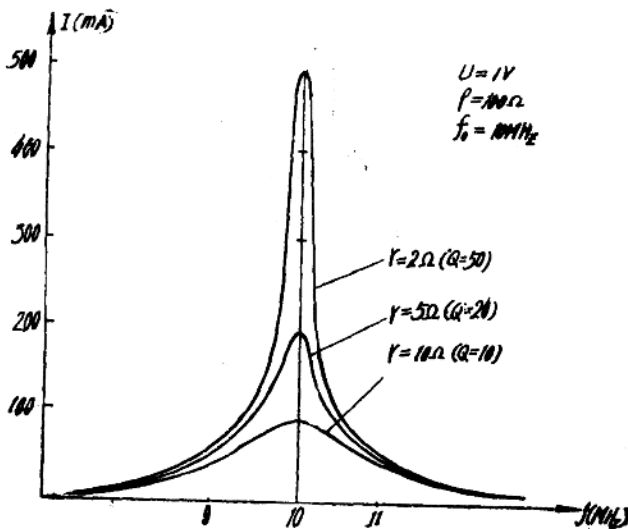


图 5-1-4

为了更便于比较不同  $Q$  值时电路的选频性能，画谐振曲线时常以电流相对值  $\frac{I}{I_0}$  为纵坐标，以角频率相对值  $\frac{\omega}{\omega_0}$  为横坐标。

由于

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}}$$

$$I_0 = \frac{U}{r}$$

则 
$$\frac{I}{I_0} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{r}\right)^2}} \quad (5-1-9a)$$

而

$$\begin{aligned} \frac{x}{r} &= \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} = \frac{\omega L}{r} - \frac{1}{\omega Cr} \\ &= \frac{\omega_0 \omega L}{\omega_0 r} - \frac{\omega_0 L}{\omega_0 L \omega Cr} \\ &= \frac{\omega_0 L}{r} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \\ &= Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \end{aligned}$$

令

$$N(f) = \frac{I}{I_0}$$

所以

$$N(f) = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (5-1-9b)$$

上式  $N(f)$  是频率的函数，叫谐振函数，简称为  $N$ 。由上式绘出不同  $Q$  值的电流谐振曲线如图 5-1-5 所示。由图可见，回路  $Q$  值愈高，曲线愈尖锐，这表示：在谐振频率附近，

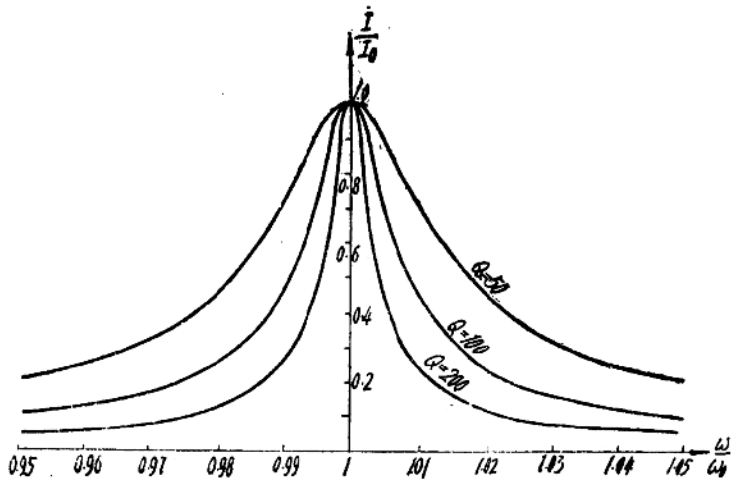


图5-1-5

回路电流较大；在远离谐振频率处，回路电流较小，而且  $Q$  愈高， $I$  愈小。在电子线路中常用电路的这个性质来选择所需要的电信号。 $Q$  值越高，曲线越尖锐，选择性越好。

用以上曲线来表示回路电流随频率变化情况，对于不同的回路就要作出不同的曲线。实际上不同串联谐振回路的频率特性有共同的规律性，可以用一根通用的谐振曲线来表示。为

了画出通用谐振曲线，引用一个表示回路失谐程度的量叫一般失谐或广义失谐，用  $\xi$  表示，它定义为回路电抗与电阻的比值，即

$$\xi = \frac{x}{r} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} = Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (5-1-10)$$

$\xi$  是角频率  $\omega$  (或  $f$ ) 的函数，同时与  $Q$ 、 $\omega_0$  有关。式 (5-1-9b) 可以写为

$$N = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}} \quad (5-1-11b)$$

上式就是通用谐振曲线的方程式。以  $\xi$  为自变量，画出通用谐振曲线如图 5-1-6 所示。

曲线说明：谐振时， $x = 0$ ， $\xi = 0$ ， $I = I_0$ ， $\frac{I}{I_0} = 1$ ； $|x|$  增加， $|\xi|$  增加， $\frac{I}{I_0}$  减小。当  $x > 0$  时， $\xi$  为正， $x < 0$  时， $\xi$  为负。利用通用谐振曲线，可以分析和计算各种不同的串联谐振回路的电流。例如已知回路参数  $r$ 、 $L$ 、 $C$  及信号源的电压及其频率  $f$ ，欲求回路电流，可以先计算  $f_0$ 、 $I_0$  及  $\xi$ ，然后在图 5-1-6 曲线图上查出  $\frac{I}{I_0}$  之值，最后求出  $I$  之值。

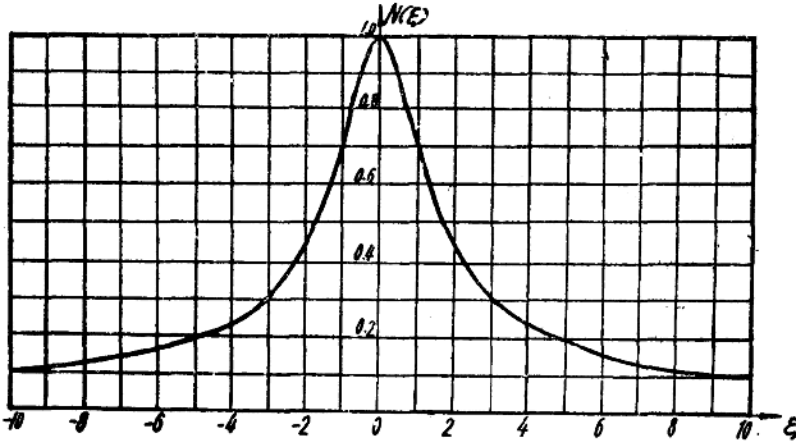


图5-1-6

有时还用到相对失谐的概念，相对失谐用  $e$  表示。它的定义是

$$e = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}$$

一般失谐与相对失谐的关系为

$$\xi = \frac{x}{r} = Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = Qe$$

当失谐不大，即离开谐振频率不远时， $f + f_0 \approx 2f_0$ ，于是

$$e = \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} = \frac{(f + f_0)(f - f_0)}{ff_0} \approx \frac{2(f - f_0)}{f_0} = \frac{2\Delta f}{f_0} \quad (5-1-12)$$

则

$$\xi = \frac{x}{r} = Qe \approx Q \frac{2\Delta f}{f_0} \quad (5-1-13)$$

$$N = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}} \quad (5-1-14)$$

式中  $\Delta f$  称为频偏。可以证明，当  $\frac{|f-f_0|}{f_0} < 0.1$  时，用近似公式 (5-1-12) 计算，其误差小于 5%。

【例题】已知  $r$ 、 $L$ 、 $C$  串联谐振电路  $f_0 = 1\text{MC}$ ， $Q = 100$ ，谐振时的电流为  $0.3\text{A}$ 。如果  $U$  的数值和元件参数不变，而把电源频率改为  $991.5\text{KC}$ ，求这时的电流。

解：频偏  $\Delta f = f - f_0 = 991.5 - 1000 = -8.5\text{KC}$

$$\begin{aligned} \text{一般失谐} \quad \xi &= Q \frac{2\Delta f}{f_0} = \frac{100 \times 2 \times (-8.5)}{1000} \\ &= -1.70 \end{aligned}$$

在通用曲线上查得

$$\xi = -1.7 \text{ 时}$$

$$\frac{I}{I_0} = 0.5$$

所以在  $f = 991.5\text{KC}$  时，电流为

$$I = 0.5I_0 = 0.5 \times 0.3 = 0.15\text{A}$$

### (三) 相位频率特性

相位特性曲线的方程，可以写为

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctg \frac{x}{r} = \arctg Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \\ &= \arctg \xi \approx \arctg \left( Q \frac{2\Delta f}{f_0} \right) \end{aligned} \quad (5-1-15)$$

根据上式，可绘出  $\varphi$  随  $\frac{\omega}{\omega_0}$  而变化的曲线，如图 5-1-7 所示。由图可见， $Q$  值越

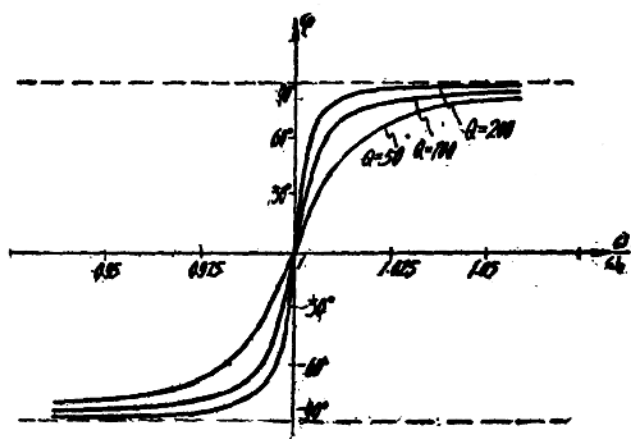


图5-1-7

高，在谐振点附近的曲线斜率越大。当信号源频率  $\omega$  低于谐振频率  $\omega_0$  时， $\frac{\omega}{\omega_0}$  小于 1，阻抗角  $\varphi$  为负值，电流超前于电压，表示电路呈电容性；反之，当  $\omega$  高于  $\omega_0$  时，

$\frac{\omega}{\omega_0}$  大于 1，阻抗角  $\varphi$  为正值，电流滞后于电压，电路呈电感性；当  $\omega$  等于  $\omega_0$  时，

$\frac{\omega}{\omega_0}$  等于 1， $\varphi = 0^\circ$ ，电流和电压同相，电路呈电阻性，电路发生谐振。

如果以  $\xi$  为自变量，可以得到一条通用相位特性曲线，如图 5-1-8 所示。

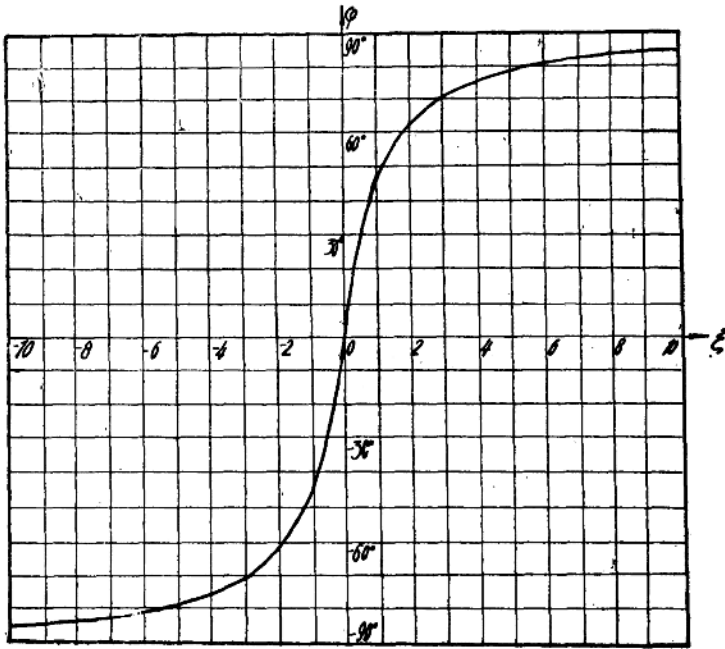


图5-1-8

#### 四、串联振荡电路的通频带

以上分析指出，串联谐振电路具有选择性。 $Q$  值愈高，谐振曲线愈尖锐，选择信号的能力愈强。可是，无线电信号并不是单一频率的信号，而总是占有一定的频带。如果电路  $Q$  值太高，其谐振曲线过于尖锐，只能将谐振点附近很窄的一些频率成分选出来，还有一些应该选入的频率成分被严重削弱，因而信号通过振荡电路后，产生严重失真而影响辨认。为了衡量振荡电路对信号的通过能力，引用通频带这个物理量。

实践表明，信号各频率成分的比例变化不大时，并不影响辨认，通常规定在谐振曲线上满足  $\frac{I}{I_0} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$  所包含的频率范围，称为振荡电路的通频带(见图 5-1-9)，通频带宽度

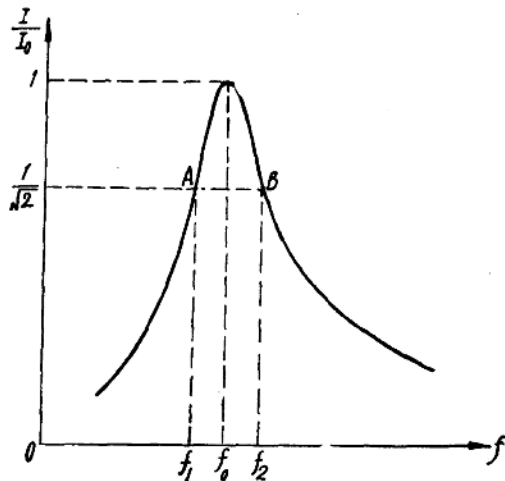


图5-1-9



简称带宽，用  $B$  表示，即

$$B = f_2 - f_1 \quad (5-1-16)$$

式中  $f_2$ 、 $f_1$  为通频带的边界频率， $f_2$  叫上界频率， $f_1$  叫下界频率。在  $f_1$  和  $f_2$  处，回路电流为谐振电流的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍，所以在同一负载上，功率恰为谐振点功率的  $\frac{1}{2}$ ，因此在谐振曲线上，对应于  $f_1$  和  $f_2$  的两点又称为半功率点。

下面推导通频带  $B$  的计算公式：

$$\text{因} \quad \frac{I}{I_0} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(Q \frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2}}$$

$$\text{当} \quad \frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{则} \quad Q \cdot \frac{2|\Delta f|}{f_0} = 1$$

$$\text{而} \quad 2|\Delta f| = |(f_2 - f_0) + (f_0 - f_1)| = |f_2 - f_1|$$

$$\text{所以} \quad B = f_2 - f_1 = 2|\Delta f| = \frac{f_0}{Q} \quad (5-1-17)$$

而相对通频带  $B'$  为

$$B' = \frac{2|\Delta f|}{f_0} = \frac{1}{Q}$$

从 (5-1-17) 式，可以明确以下几点：

(1) 电路的通频带与电路的品质因数  $Q$  成反比。相对通频带就是  $Q$  值的倒数。因此，电路的选择性与通频带之间存在着矛盾，从选择性出发要求  $Q$  值要高，为了加宽通频带，减少传输失真，则  $Q$  值不能太高。

(2) 当  $Q$  值不变时，通频带和  $f_0$  成正比。回路谐振频率越高，其通频带越宽。

(3) 根据公式 (5-1-17)，我们可以用实验方法来测定回路的  $Q$  值。方法是：首先保持信号源电压不变，改变信号源频率，测出回路电流达到最大值时的频率  $f_0$ ，再测出电流减小到谐振电流  $I_0$  的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  倍时的两个边界频率  $f_1$  及  $f_2$ ，求出通频带，最后根据公式 (5-1-17) 求  $Q$  值。

**【例题】** 已知某串联回路  $L = 100 \mu H$ ， $C = 100 P F$ ， $r = 10 \Omega$ ，电源电压  $U = 10 m V$ 。求：

- (1) 谐振时的  $x_0$ 、 $Z_0$ 、 $I_0$ ；
- (2) 回路的  $f_0$ 、 $Q$  和  $B$ ；
- (3) 上界频率和下界频率处的  $I'$ 、 $x'$ 、 $z'$  和阻抗性质。

解：

(1) 根据谐振定义可知， $x_0 = 0$ ， $Z_0 = r = 10 \Omega$ ，

$$I_0 = \frac{U}{Z_0} = \frac{10 \times 10^{-3}}{10} = 1 m A$$

$$(2) \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{10^{-4} \times 10^{-10}}} = 10^7 \text{ 弧度/秒}$$