DAXUESHENG ZHI YOU

电子电路解题分析 下

江苏科学技术出版社

《大学生之友》丛书出版说明

大学理工科的学生，包括电视大学、职工大学的学生，在学习过程中往往要演算大量的习题，以加深对课程内容的理解和记忆。但在解题时，经常会遇到各种各样的困难。《大学生之友》丛书就是为了帮助他们提高解题能力，熟练演算技巧，牢固地掌握学科知识而出版的。

丛书以解题分析为主。为了便于阅读，每节首先简要介绍有关的概念、定律和公式。然后，用较大的篇幅选择有代表性的例题进行剖析，讲述解题的思路，归纳解题的规律，指出必须注意的事项。最后，附以适量的习题，并提供答案或提示。

丛书内容密切配合大学教材，选题以数理化基础课和专业基础课为主，兼顾各专业课。各书的出版时间，也基本上按此顺序安排，逐步配套。

我们的愿望，想使这套丛书成为大学生喜爱的"朋友"。能否如愿，还有待于广大师生的检验。我们诚恳地欢迎读者对每一本书提出宝贵意见，使它们成为名副其实的"大学生之友"。

江苏科学技术出版社

目 录

第七章 选频放大器

第八章 正弦波振荡器

第九章　频率变换

第十章　直流电源

第十一章 脉冲数字电路

附录 放大器频率特性的波特(Bode)图解法

第七章　选频放大器

本章主要内容

选频放大器分为 LC 调谐放大器和 RC 选频放大器两类。

本章第一节介绍了 LC 调谐放大器的基本部件——并联谐振回路各物理量的计算方法及用 y 参数等效电路分析计算 LC 调谐放大器的基本方法。第二节介绍了 RC 对称双 T 网络选频放大器的幅频特性、相频特性、等效品质因数及通频带等物理量的分析计算方法。

§7-1　LC调谐放大器

LC 调谐放大器是一种窄频带的高频放大器，它只选择所需的某频率 f_0 的信号或者在 f_0 两边很窄范围内的信号加以放大。例如，调幅广播收音机的中频放大器要求放大465±5KHz 的频率信号，中心频率 f_0 是 465kHz；调频接收机的中频 f_0 是 10.7MHz；电视接收机第一频道高频放大器的频率范围为 48—58MHz 等等。LC 调谐放大器不仅广泛应用于无线电接收设备中，而且在测试仪表中也普遍应用。

一、谐 振 回 路

1．原理与公式

(1) 串并联电路的等效变换

任何由电阻和电抗构成的串联电路，都可以等效为具有

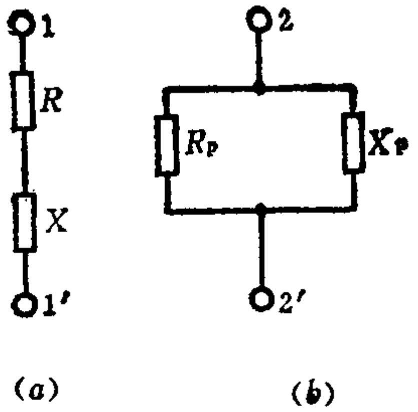


图 7-1-1

相同阻抗的等效并联电路。如图 7-1-1 所示，图(a) 所示的电阻 R 和电抗X 相串联的电路，可以等效为图 (b) 所示的由 R_p 和 X_p 相并联的电路。图中，1-1′ 和 2-2′两端导纳应该相等，即

$$\frac{1}{R+jX}=\frac{1}{R_p}+\frac{1}{jX_p} \tag{7-1-1}$$

而
$$\frac{1}{R+jX}=\frac{R-jX}{(R+jX)(R-jX)}$$
$$=\frac{R}{R^2+X^2}-j\frac{X}{R^2+X^2} \tag{7-1-2}$$

(7-1-1)式右边和(7-1-2)式右边应恒等，所以

$$\frac{1}{R_p}=\frac{R}{R^2+X^2}$$

$$\frac{1}{X_p}=\frac{X}{R^2+X^2}$$

即
$$R_p=R+\frac{X^2}{R} \tag{7-1-3}$$

$$X_p=X+\frac{R^2}{X} \tag{7-1-4}$$

(7-1-3)和(7-1-4)两式，是图 7-1-1(a)等效为图 7-1-1(b)的等效关系。

同理，若图 7-1-1(b)所示的并联电路转化为图 7-1-1(a) 所示的串联电路，则它们的等效关系为

$$R = \frac{R_p X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \tag{7-1-5}$$

$$X = \frac{R_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \tag{7-1-6}$$

图7-1-1所示的串、并联电路，为了表示它的损耗，可用品质因数Q（简称Q值）这个物理量来描述。Q值的定义为

$$Q = \frac{2\pi \times \text{电抗元件中贮存的能量}}{\text{电阻}R\text{在一周期内损耗的能量}} \tag{7-1-7}$$

对于图 7-1-1(a)所示的单个电抗元件和电阻串联的电路，可以推得，其Q值为

$$Q = \frac{X}{R} \tag{7-1-8}$$

对于图 7-1-1(b)所示的单个电抗元件和电阻并联的电路，可以推得，其Q值为

$$Q = \frac{R_p}{X_p} \tag{7-1-9}$$

（2）LC并联谐振回路

信号源与电感线圈和电容器并联组成的电路，叫做LC并联回路，如图 7-1-2 所示。图中，R为电感的损耗电阻，一般不大。

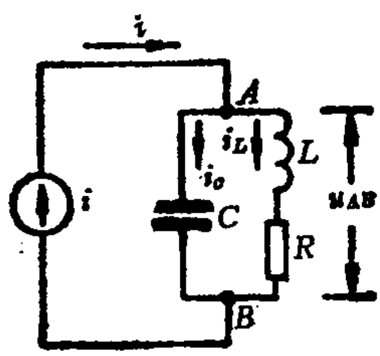


图 7-1-2

① 频率特性

LC 并联谐振回路 加上电流i时，回路两端 电 压 等于

$$u_{AB} = iZ = i\frac{(R + j\omega L)\frac{1}{j\omega C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

通常，电流频率在谐振频率 f_0 附近，满足 $\omega L \gg R$，

所以
$$u_{AB} \approx i \frac{\frac{L}{C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

因此有
$$U_{AB} \approx I \frac{\frac{L}{C}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \qquad (7\text{-}1\text{-}10)$$

$$\varphi \approx -\mathrm{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \qquad (7\text{-}1\text{-}11)$$

式中，U_{AB} 为电压的大小；φ 为电压相对于电流的相位差。

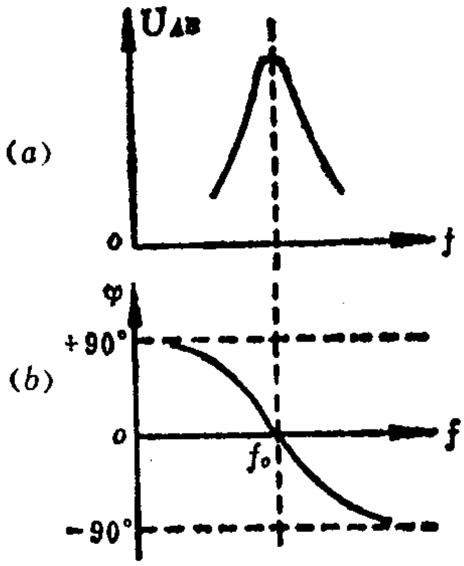


图 7-1-3

图7-1-3(a)是并联回路端电压 U_{AB} 随频率变化的曲线；图(b)是 U_{AB} 相角随频率变化的曲线。

当信号频率等于某一特定频率 f_0 时，回路两端电压为最大，并且回路两端的压降 u_{AB} 与总电流 i 同相位，即相位差 φ 为零（$\varphi = 0$），回路阻抗呈现纯电阻，这种现象称为并联谐振。

② 谐振频率 f_0

并联谐振时，其谐振频率从(7-1-10)式很容易求出，即

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

所以
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (7\text{-}1\text{-}12)$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

③ 品质因数Q

由(7-1-8)式得

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o CR} \tag{7-1-13}$$

(7-1-13)式也可改写成

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{R} \tag{7-1-14}$$

式中 $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$称特性阻抗。

④ 谐振曲线与通频带B

在谐振点 $f = f_o$ 时，由(7-1-10)式得电压的最大值

$$U_{ABmax} \approx I\frac{L}{CR} = IQ^2R \tag{7-1-15a}$$

于是偏离 f_o 时，电压的相对变化值为

$$\frac{U_{AB}}{U_{ABmax}} \approx \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right)^2}}$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{1+\left(Q\frac{2\Delta f}{f_o}\right)^2}} \tag{7-1-15b}$$

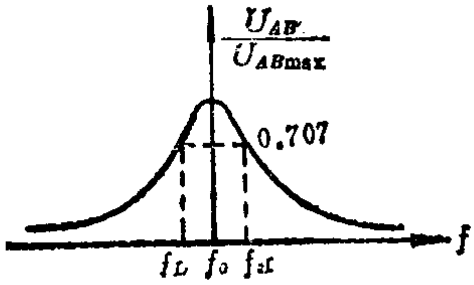


图 7-1-4

图7-1-4是(7-1-15)式所示U_{AB}/U_{ABmax}和f的关系曲线，这曲线即是并联谐振曲线。

当 U_{AB}/U_{ABmax} 下降到 $1/\sqrt{2} = 0.707$时，所对应的频率范围称为通频带，如图 7-1-4 所

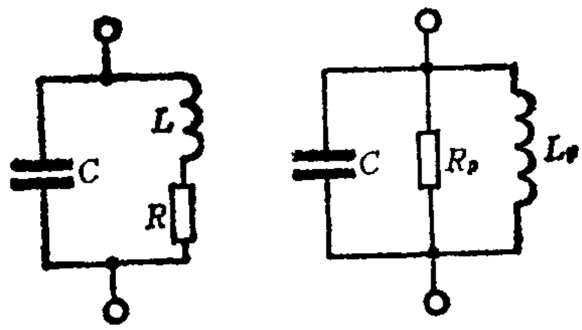
示。通频带以符号B表示，$B=f_H-f_L$。另外，还可从(7-1-15b)式推导得

$$B=2\Delta f_{0.7}=\frac{f_0}{Q} \qquad (7-1-16)$$

式中　$\Delta f_{0.7}=f_H-f_0=f_0-f_L$。

由(7-1-15a)与(7-1-16)式可见，当回路的谐振频率f_0确定后，Q值越小，则通频带B越宽，谐振电压越小；Q值越高，则B越窄，谐振电压越大。

⑤ 谐振阻抗R_p及外电路并联电阻R_L对回路的影响



(a)　(b)

图 7-1-5

为了讨论问题方便，常常把图7-1-5(a)的并联回路等效成图7-1-5(b)的并联回路。由(7-1-3)式和(7-1-4)式可得到它们的等效关系式

$$R_p=R+\frac{(\omega_0 L)^2}{R}$$

$$\omega_0 L_p=\omega_0 L+\frac{R^2}{\omega_0 L}$$

在一般情况下，$\omega_0 L\gg R$，也就是说电感L的品质因数$Q=\frac{\omega_0 L}{R}$是甚大于一，因此$\frac{\omega_0^2 L^2}{R}\gg R$，$\omega_0 L\gg\frac{R^2}{\omega_0 L}$。所以，上两式近似为

$$R_p\approx\frac{(\omega_0 L)^2}{R}=\frac{L}{RC}=Q^2 R \qquad (7-1-17)$$

$$L_p\approx L$$

可以证明，(7-1-17)式就是并联谐振阻抗的表示式。

若在并联回路两端接有一电阻 R_L，则这时的谐振阻抗

$$R_o = R_p \parallel R_L$$

由(7-1-9)式，图 7-1-6 所示并联谐振回路的 Q 值为

$$Q_L = \frac{R_o}{\omega_o L} \qquad (7\text{-}1\text{-}18a)$$

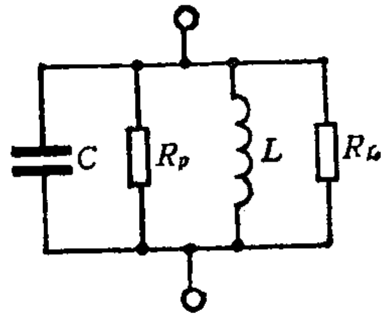


图 7-1-6

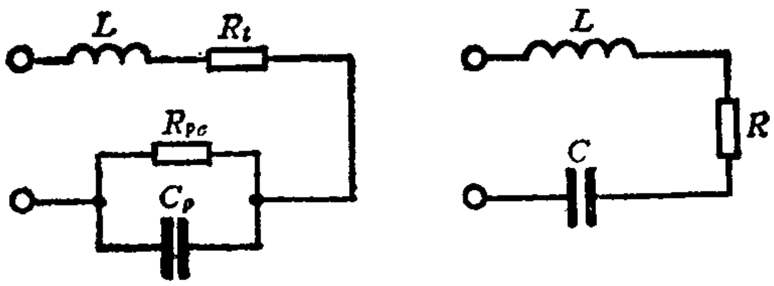
Q_L 称为有载 Q 值。而图 7-1-5(b) 所示未接有负载 R_L 时的 Q 值为

$$Q_o = \frac{R_p}{\omega_o L} \qquad (7\text{-}1\text{-}18b)$$

Q_0 称为空载 Q 值。显然，有载 Q 值 Q_L 小于空载 Q 值 Q_o。

2．解题与分析

例7-1-1 把电感线圈 L 和电容器 C 串接起来，如图7-1-7(a)所示。图中，R_l 为电感线圈的等效串联电阻，表示线圈的损耗；R_{pc} 为电容的等效并联电阻，表示电容器的损耗。若给定线圈 $L = 585\mu H$，$Q_l = 100$；电容 $C_p = 200pF$，等效并联电阻 $R_{pc} = 30M\Omega$；工作频率 $f = 465kHz$。求其等效为图 7-1-7(b)后的 C 和 R。



(a) (b)

图 7-1-7

解 图 7-1-7(b)中的电阻 R 显然是两部分之和，一部分是电感线圈 L 的等效串联电阻 R_l；另一部分是电容器等效並

联电阻 R_{pc} 转换成的串联电阻 R_c. 也就是说

$$R = R_l + R_c$$

现在分别求 R_l 和 R_c:

根据已知条件，电感线圈 $L = 585\mu H$, $Q_l = 100$, $f = 465$ kHz,所以由(7-1-8)式即得

$$R_l = \frac{\omega L}{Q_l} = \frac{2\pi \times 465 \times 10^3 \times 585 \times 10^{-6}}{100}$$

$$= \frac{1710}{100} \approx 17\,\Omega$$

把电容器等效并联电阻 R_{pc} 转换成串联形式,可由式(7-1-5)算得

$$R_c = \frac{R_{pc}\dfrac{1}{(\omega C_p)^2}}{R_{pc}^2 + \dfrac{1}{(\omega C_p)^2}} = \frac{\dfrac{1}{R_{pc}\omega^2 C_p^2}}{1 + \left(\dfrac{1}{R_{pc}\omega C_p}\right)^2}$$

因为

$$\frac{1}{R_{pc}\omega^2 C_p^2} = \frac{1}{30 \times 10^6 \times (2\pi \times 465 \times 10^3)^2 \times (200 \times 10^{-12})^2}$$

$$\approx 0.098\,\Omega$$

$$\left(\frac{1}{R_{pc}\omega C_p}\right)^2 = \frac{1}{R_{pc} \cdot R_{pc}\omega^2 C_p^2} = \frac{0.098}{30 \times 10^6}$$

$$= 3.27 \times 10^{-9}$$

所以 $$R_c = \frac{0.098}{1 + 3.27 \times 10^{-9}} = 0.098\,\Omega$$

因此图 7-1-7(b)中的 R 为

$$R = R_l + R_c = 17 + 0.098 \approx 17\,\Omega$$

最后求图 7-1-7(b)中的电容 C。电容 C 是由并联形式转化为串联形式后的电容,所以由(7-1-6)式可得

$$\frac{1}{\omega C}=\frac{R_{pc}^2\frac{1}{\omega C_p}}{R_{pc}^2+\left(\frac{1}{\omega C_p}\right)^2}=\frac{\frac{1}{\omega C_p}}{1+\left(\frac{1}{R_{pc}\omega C_p}\right)^2}$$

因为 $$\frac{1}{(R_{pc}\omega C_p)^2}=3.27\times10^{-9}$$

所以 $$\frac{1}{\omega C}=\frac{\frac{1}{\omega C_p}}{1+3.27\times10^{-9}}\approx\frac{1}{\omega C_p}$$

$$C\approx C_p=200\text{pF}$$

例7-1-2 给定并联谐振回路的 $f_o=30\text{MHz}$、$C=30\text{pF}$，线圈Q值约为100，信号源电流 $I=1\text{mA}$。求电感 L、等效并联电阻以及谐振时谐振回路端电压 U_m。

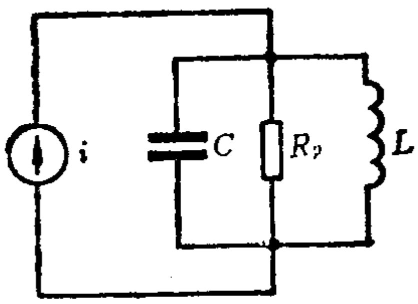


图 7-1-8

解 首先根据题意画出并联谐振回路，如图7-1-8所示。由于谐振频率 f_o、回路电容 C 和线圈Q值已知，并且 $Q\gg1$，要求回路电感 L，那就很自然的想到公式(7-1-12)，即

$$f_o=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

从中解出

$$L=\frac{1}{(2\pi)^2f_o^2C}=\frac{1}{(6.28)^2\times(30\times10^6)^2\times30\times10^{-12}}$$
$$=0.94\mu\text{H}$$

这里要注意的是：公式(7-1-12)是一个近似公式，在利用它时有一定条件，即 $Q\gg1$。若不满足这条件，必须用精确的公式，即

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{1-\frac{1}{Q^2}} \qquad (7\text{-}1\text{-}19)$$

当然我们不研究低Q並联回路，所以(7-1-19)公式很少使用。Q值较高时，(7-1-19)式与(7-1-12)式近似一致，因此只要记住公式(7-1-12)就行了。但是，也要知道(7-1-19)式的含意，否则对并联谐振回路的了解就不全面。

最后求并联谐振回路的谐振阻抗 R_p 和输出电压 U_{max}。

由(7-1-18a)式有

$$Q = \frac{R_p}{\omega_o L}$$

所以 $$R_p = Q\omega_o L = 100\times 2\pi\times 30\times 10^6\times 0.94\times 10^{-6}$$
$$= 18\,\mathrm{k}\Omega$$

谐振时 $f = f_o$，由(7-1-10)式，并考虑到(7-1-17)式，因此输出电压的最大值为

$$U_{max} = I\frac{L}{CR} = IR_p = 1\times 18 = 18\mathrm{V}$$

例7-1-3 设给定并联谐振回路的 $f_o = 1\mathrm{MHz}$、$Q = 50$，若输出电压超前信号源电流相位 45°。试求：

(1) 此时信号源频率 f 是多少？输出电压相对于谐振时衰减了多少分贝？

(2) 若把Q改为100，再求以上两值。

解 该题应从“输出电压超前信号源电流相位45°”这一句话着手进行解题。

为了分析方便，现将(7-1-15)和(7-1-11)两式重写于下

$$\frac{U_{AB}}{U_{ABmax}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\omega L-\frac{1}{\omega C}}{R}\right)^2}} \qquad (7\text{-}1\text{-}20)$$

$$\varphi = -\operatorname{arctg}\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \tag{7-1-21}$$

式中，U_{AB} 表示输出电压；U_{ABmax} 表示（谐振时）输出电压的最大值；φ 表示输出电压与信号源电流之间的相位角。

根据已知条件，将相位角 45° 代入(7-1-21)式得

$$45° = -\operatorname{arctg}\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

因此

$$\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = -1 \tag{7-1-22}$$

把(7-1-22)式代入(7-1-20)式得

$$\frac{U_{AB}}{U_{ABmax}} = \frac{1}{\sqrt{1+(-1)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$\frac{U_{AB}}{U_{ABmax}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 即是定义通频带（$B = f_H - f_L$）的条件，并且 $\frac{U_{AB}}{U_{ABmax}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 所对应的频率分别为 f_H 和 f_L。

由此看出，要求解当输出电压超前信号源电流相位45°时的信号源频率 f 值，必须先求出通频带。

（1）当 $f_0 = 1\text{MHz}$、$Q = 50$时，由公式（7-1-16）可求得通频带（如图 7-1-4 所示）

$$B = 2\,\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q} = \frac{1}{50} = 0.02\text{MHz}$$

所以

$$\Delta f = \Delta f_{0.7} = \frac{0.20}{2} = 0.01\text{MHz}$$

又因为输出电压超前信号源电流相位45°，即 $\varphi = +45°$，则由(7-1-21)式看出，只有当 $\omega < \omega_0$（即 $f < f_0$）时，才能使 φ 为正值，所以信号源频率

$$f=f_o-\Delta f=1-0.01=0.99\text{MHz}=990\text{kHz}$$

因为
$$\frac{U_{AB}}{U_{AB\max}}=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

于是根据分贝定义

$$20\log\frac{U_{AB}}{U_{AB\max}}=20\log\frac{1}{\sqrt{2}}=20\log 2^{-\frac{1}{2}}$$
$$=-10\log 2=-3\text{dB}$$

即输出电压相对于谐振时衰减了 3dB。

(2) 当 $f_o=1\text{MHz}, Q=100$ 时，则通频带

$$B=2\Delta f=\frac{f_o}{Q}=\frac{1}{100}=0.01\text{MHz}$$
$$\Delta f=0.005\text{MHz}$$

由此看出，Q 值变高，通频带确实变窄了。

同理，信号源频率

$$f=f_o-\Delta f=1-0.005=995\text{kHz}$$

输出电压相对于谐振时仍然衰减了 3dB。

必须注意，如果输出电压与信号源电流之间的相位不是相差 45°，那末就不能直接采用(7-1-16)式，而应按(7-1-21)式计算(详见例 7-1-4)。

例 7-1-4 设并联谐振回路的 $f_0=1\text{MHz}$、$Q=100$，输出电压落后信号源电流相位 55°，求此时信号频率 f 为多少？输出电压相对于谐振时衰减了多少分贝？

解 由(7-1-21)式

$$\varphi=-\operatorname{arctg}\frac{\omega L-\frac{1}{\omega C}}{R}$$

令
$$\frac{\omega L-\frac{1}{\omega C}}{R}=-\zeta \qquad (7\text{-}1\text{-}23a)$$