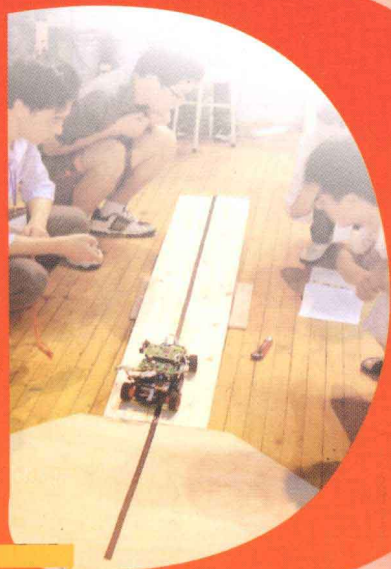


大学生电子设计丛书



GAOPIN DIANLU
SHEJI YU ZHIZUO

高频电路 设计与制作

主 编 鲍景富
副主编 陈 瑜 杨忠孝



电子科技大学出版社

大学生电子设计丛书

GAOPIN DIANLU
SHEJI YU ZHIZUO

高频电路 设计与制作

主 编 鲍景富

副主编 陈 瑜 杨忠孝



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高频电路设计与制作 / 鲍景富主编. —成都:
电子科技大学出版社, 2012.4
(大学生电子设计丛书)
ISBN 978-7-5647-1123-8

I. ①高… II. ①鲍… III. ①高频—电子电路—电路
设计②高频—电子电路—制作 IV. ①TN710.2-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 043533 号

大学生电子设计丛书
高频电路设计与制作

主 编 鲍景富
副主编 陈 瑜 杨忠孝

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
策划编辑: 谢应成 张克铃
责任编辑: 谢应成
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 四川川印印务有限公司
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 20 字数 487 千字
版 次: 2012 年 4 月第一版
印 次: 2012 年 4 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-1123-8
定 价: 42.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

《大学生电子设计丛书》编委名单

(以下姓名按笔画排列)

刘 伟 李玉柏 李良超 李晓宁

李朝海 余 魅 杨月寒 杨忠孝

杨 炼 邹 林 陈祝明 陈 瑜

沈 洁 吴 涛 张 钜 林静然

钟洪声 皇晓辉 唐 续 崔红玲

程红霞 鲍景富

序

大学生的科技活动已经成为人才培养的重要环节。开展大学生科技竞赛的训练和比赛可以检验学生所学课程知识的掌握程度，培养学生的科研能力和工程经验，搭起书本知识与工程实践的桥梁。全国大学生电子设计竞赛坚持以促进课程建设和教学改革为目的，在电子技术工科专业的人才培养中发挥了巨大的作用。电子科技大学在组织和培训大学生参加电子设计竞赛方面成绩显著，经验丰富，并开设了全校公共选修课《电子设计与制作》实践课程，以培养学生的设计与科研能力，这是教学改革的一种探索与实践。

电子科技大学在《电子设计与制作》实践课程的建设中，突出动手引导型的教学模式，教学内容实现了“单知识点学习与应用”向“系统知识学习与应用”、“被动验证、设计与制作”向“自主命题、设计与开发”、“单一知识设计”向“系统产品制作”以及“实验报告编写”向“设计报告和科技论文撰写”的转变。经过教学实践，取得了较好的教学效果。

在总结课程建设和学生培训的经验基础上，学校组织相关教师编写了《大学生电子设计丛书》，共计四本。

第一本书《电子电路设计技术基础》，主要介绍电子设计的基础知识、电子元器件选取与识别、基本电路的设计与制作、电路设计工具的使用、信号完整性分析、基本电子仪器的应用、电子电路调试、测试和分析等电子设计基础知识。

第二本书《最小系统设计与应用》，主要介绍电子系统核心电路——处理器最小系统的设计，具体包括，单片微型计算机的结构、最小系统的评估和核心芯片选取、最小系统的存储结构和设备设计、最小系统开发环境和软件开发、系统应用软件优化、最小系统低功耗处理技术，以及最小系统的典型应用。

第三本书《高频电路设计与制作》，主要介绍高频电子系统的核心电路，比如 LC 选频放大电路设计、功率放大电路设计、频率合成原理与 PLL 电路设计、信号的调制与解调电路设计、频率上下搬移电路设计、滤波器设计、阻抗匹配原理和匹配电路设计等。

第四本书《电子系统专题设计与制作》，以电子技术应用的专题方向，分类介绍专题设计制作的基础知识和设计难点，并结合电源系统设计、测量系统设计、数字电路设计、通信系统设计和控制系统设计等具体应用方向的典型系统设计，介绍系统产品开发的理论知识和设计步骤。

本套丛书覆盖从基础的电路设计知识到最小核心系统设计，从模块电路到系统电路多方面内容，对指导大学生参加电子设计的科技活动和科技竞赛有一定的参考价值。

全国大学生电子设计竞赛四川赛区专家组

前 言

高频电路是电子信息工程专业学生的重要课程，目前有许多学校的电子类专业也开设此类课程，但是一般都处于课本的基础理论阶段，针对本科生实验教学的课本还不多，然而对掌握高频电路知识而言，仅有理论是不够的，我们根据高频电路的特点增加一些实验环节，达到“实践出真知和熟能生巧”的目的，基于这种考虑，我们编写组的老师编写了此书。本书分为三个层次，第一个层次是高频电路设计基础理论内容，包括高频电路设计基础，如低噪声放大器设计、匹配电路，振荡器及频率合成器设计基础，混频电路倍频电路及滤波与匹配电路的内容；第二个层次高频基础模块电路设计，内容包括高频元件仪器介绍、放大器设计方法等，第三个层次高频电路仿真及设计实例解析，内容包括 ADS 仿真使用基础，功率放大器制作和测试，频率合成器及频率变换器的设计和测试等，并配有基本电路，有利于学生的学习和理解，这样学生就能按层次学习和提高。

参加本书编写的教师有鲍景富、陈瑜、杨忠孝、李潮海、李良超等同志，编写组的老师从事高频电子线路课程的教学与科研工作多年，也多次参与和指导参加电子设计竞赛学生的培训工作，具有丰富的经验。在本书编写过程中得到了许多博士生、硕士研究生及参加过电子设计竞赛同学的协助，他们是李智鹏博士、郑永华硕士、吴穹硕士、张东旭硕士、曹存文硕士、李丰军硕士、何文斌、周光耀、王一军、徐亮、彭俊、王炳文、贾颖焘、蒋俊文、任田昊、唐晨杰、唐亦尘等同学，他们在实验数据的测试整理以及绘图方面做了许多有效的工作，在此一并表示感谢。

本书适合大学高年级学生、参加电子设计竞赛的同学、高频电路将要入门的初学者，也适合业余无线电爱好者等。

由于时间仓促，书中定会有一些错误的地方，希望读者批评指正。

鲍景富

2012年3月于成都

目 录

第 1 章 高频电路设计基础理论.....	1
1.1 放大电路设计基础.....	1
1.1.1 小信号放大器.....	1
1.1.2 功率放大器.....	21
1.2 振荡器和频率合成电路设计基础.....	35
1.2.1 锁相式频率合成技术.....	35
1.2.2 直接数字合成技术 (DDS)	49
1.2.3 振荡器基础.....	52
1.3 混频器的设计基础.....	62
1.3.1 混频器的功能及工作原理.....	63
1.3.2 混频器性能指标分析.....	65
1.3.3 无源混频器.....	66
1.3.4 有源混频器.....	71
1.3.5 倍频器设计.....	77
1.3.6 射频电路模块应用案例.....	78
1.4 滤波器与阻抗匹配电路设计基础.....	83
1.4.1 滤波器设计基础.....	83
1.4.2 阻抗匹配网络设计.....	96
1.5 调制与解调电路设计基础.....	101
1.5.1 模拟乘法器.....	101
1.5.2 幅度调制与解调.....	104
1.5.3 频率调制与解调.....	117
1.5.4 相位调制及其解调.....	133
1.5.5 数字调制与解调.....	139
第 2 章 高频基础模块电路设计.....	149
2.1 高频元件.....	149
2.1.1 高频元件的选择.....	149
2.2 高频电路制作和调试的注意事项.....	156
2.2.1 高频功率测量的方法.....	156
2.2.2 高频元件的布局.....	157
2.2.3 制作电路时应保护电路元件.....	158

高频电路设计 与制作

2.2.4	高频电子电路的制作	158
2.3	高频电路调试仪器简介	159
2.3.1	直流稳压电源	159
2.3.2	示波器	160
2.3.3	频谱分析仪	164
2.3.4	矢量网络分析仪	167
2.3.5	信号发生器	169
2.3.6	频率特性测试仪	172
2.3.7	晶体管毫伏表	175
2.3.8	半导体管特性图示仪	176
2.3.9	LCR 测量仪	179
2.3.10	逻辑分析仪	181
2.3.11	等精度通用计数器	183
2.4	高频小信号放大器设计	186
2.4.1	高频小信号放大器设计的基本要求	186
2.4.2	指标分析与方案论证	186
2.5	高频功放设计	193
2.5.1	可选方案解析	193
2.5.2	设计实例	204
2.6	频率合成电路设计	214
2.6.1	频率合成技术的划分	214
2.6.2	频率合成器的关键技术参数	214
2.6.3	直接频率合成方法简介	215
2.6.4	间接频率合成方案简介	221
2.6.5	多种频率合成方案的对比	223
2.6.6	PLL 设计流程	223
2.6.7	设计实例	226
2.7	无线收发设计	244
2.7.1	可选方案解析	244
2.7.2	设计实例	253
第3章	高频电路仿真及设计实例解析	266
3.1	ADS 仿真原理及应用	266
3.1.1	ADS 的仿真设计方法和辅助功能设计	266
3.1.2	ADS 的主要操作窗口	266
3.1.3	ADS 基本操作	275
3.1.4	ADS 基本元件	278
3.2	30~40MHz 锁相环仿真及设计实例	282

3.2.1	压控振荡器设计.....	282
3.2.2	用 ADF4001 设计的频率合成器.....	287
3.2.3	测试结果分析.....	291
3.3	1W 宽带放大器仿真及设计实例.....	294
3.3.1	晶体管的选择.....	294
3.3.2	电路的设计与计算.....	296
3.3.3	测试结果分析.....	303
	参考文献.....	309

第1章 高频电路设计基础理论

1.1 放大电路设计基础

放大电路是执行模拟信号放大的电路。在高频电路中，接收机端的高频放大电路可以将单位为微伏 (μV) 的微小信号加以放大，而在发射机端的功率放大器可以将信号放大到足够的功率后经天线发射。本章将按照放大器的不同工作目的分别介绍小信号放大器、低噪声放大器和功率放大器的基本电路及应用。

1.1.1 小信号放大器

在无线通信系统中，接收机输入端的信号电平多为微伏数量级，将这些微弱信号放大的高频小信号放大器成为无线通信接收机的重要组成部分。被放大的微弱信号通常是具有一定频谱宽度的频带信号，与之并存的还有许多偏离信号频率的干扰信号，因此高频小信号放大器除了放大作用以外，还应具有选频功能。

高频小信号放大器的中心频率通常在几百千赫到几百兆赫，工作带宽在几十千赫兹至几十兆赫兹之间，根据工作频带的宽窄不同，高频小信号放大器有宽带型和窄带型两大类。所谓频带的宽窄，指的是相对频带，即通频带与其中心频率的比值。宽带放大器的相对频带较宽（往往在 0.1 以上），窄带放大器的相对频带较窄（往往小到 0.01）。窄带放大器对电路的增益与选频能力的要求较高，而宽带放大器需在电路结构上保证在宽频带内不失真的将信号放大至一定的增益。除了按频带分类，高频小信号放大器还可按器件分为晶体管放大器、场效应管放大器和集成电路放大器；若按负载又可分为谐振放大器和非谐振放大器。

在小信号放大器设计中，电路的增益、带宽、噪声系数、线性范围以及匹配、隔离、功耗等指标还需要根据设计目的进行合理的设置并相互兼顾。

1. LC 串并联谐振回路

(1) 串并联谐振回路特性

LC 谐振回路是高频电路里最常用的无源网络，由电感和电容组成，按照电感电容和外接信号源的连接方式分为串联谐振回路和并联谐振回路两种结构类型。利用 LC 谐振回路的幅频特性和相频特性，不仅可以进行选频，即从输入信号中选择出有用频率分量而抑制掉无用频率分量或噪声，而且还可以进行信号的频幅转换和频相转换。另外，用 L 、 C 元件还可以组成各种形式的阻抗变换电路和匹配电路。所以，LC 谐振回路虽然结构简单，但是在高频电路里却是不可缺少的重要组成部分，下面介绍 LC 回路的特点及应用。

如图 1-1 所示为简单的串联 LC 谐振回路。图中， V_S 为内阻较小的外接电压源， L 为回路电感， C 为回路电容， r 主要为电感的等效损耗电阻，回路的总阻抗为



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

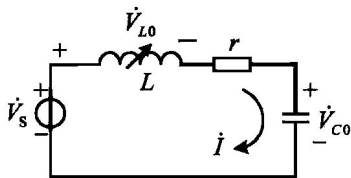


图 1-1 串联 LC 回路

电阻 r 是复数的实部，感抗与容抗之差是复数的虚部，我们把虚部称之为电抗，用 X 表示， ω 是外加信号的角频率。发生谐振的条件是容抗和感抗的大小相等，由此可得到回路的谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1-1-2)$$

当 $\omega > \omega_0$ 时，回路阻抗呈现电感性，相当于一个电感；当 $\omega < \omega_0$ 时，回路阻抗呈现电容性相当于一个电容；当 $\omega = \omega_0$ 时，回路阻抗呈现电阻性且有最小值，它这个特性在实际应用中叫做陷波器，并将电路此时的工作状态称为串联谐振， ω_0 称为谐振角频率， $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ 称为谐振频率。

图 1-2 显示了串联谐振回路的幅频特性和相频特性。可见，当 LC 串联谐振回路谐振时，回路电流 I 呈现最大值 I_0 ，回路阻抗为最小值且呈现纯电阻性。串联谐振回路是电压谐振，谐振时电感和电容两端的电压大小是激励信号电压大小的 Q 倍。其中 Q 是回路的品质因数。如图 1-3 所示，谐振时电感和电容两端的电压大小相等方向相反。可见利用串联谐振可将信号源的电压提高许多倍。相位 ϕ 是回路电流的相角。

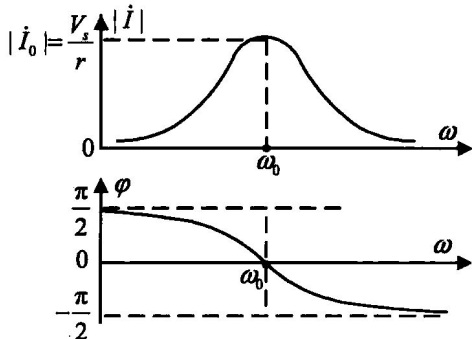


图 1-2 串联谐振回路的幅频特性和相频特性

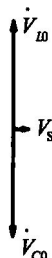


图 1-3 串联谐振回路谐振时的电压关系

品质因数 Q 是表征一个储能器件（如电感线圈、电容等）、谐振电路在某一频率下的储能同每周期耗能之比的一种质量指标。元件的 Q 值愈大，用该元件组成的电路或网络的选择性愈佳。电抗元件的 Q 值等于它的电抗同等效串联电阻的比值。对于串联谐振回路，如 $Z = r + jX$ ，则 $Q = |X|/r$ ，电容的空载品质因数一般很高，高质量的陶瓷电容和云母电容的 Q 值都在 1200 以上，一些小的微调磁介电容器的 Q 值就较小，微波电容的 Q 值也很低，在 10GHz 时为 10 或更低。但电感上存在许多损耗，在谐振回路中与电容同时存在时，还是很难达到电容的 Q 值。所以串联谐振回路主要以电感的损耗 r 来衡量回路损耗，则串联谐振回路的 Q

值为

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega CR} \quad (1-1-3)$$

图 1-2 中可看出当外加信号频率 ω 偏离电路的谐振频率时, I/I_0 均小于 1。 Q 值越高在一定的频偏下电流下降得越快, 其谐振曲线越尖锐。也就是说电路的选择性是由电路的品质因素 Q 所决定的, Q 值越高选择性越好。

实际 LC 串并联回路多以并联形式出现, 并联谐振和串联谐振的分析过程基本一致, 并联谐振回路的电路如图 1-4 所示。如图 1-5 表示了并联谐振回路的幅频和相频特性。从电流源两端看进去的阻抗为

$$Z = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (1-1-4)$$

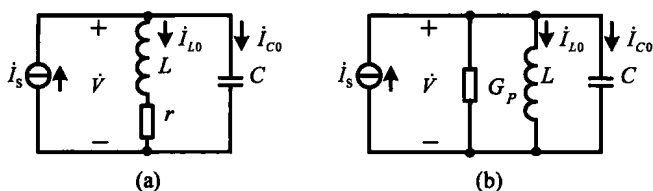


图 1-4 并联谐振回路

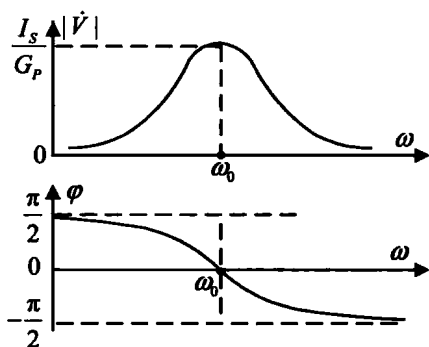


图 1-5 并联谐振回路的幅频和相频特性

在工程上总是满足, $\omega L \gg r$, 所以

$$Z \approx \frac{\frac{L}{C}}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{1}{\frac{r}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} \quad (1-1-5)$$

令

$$R_p = \frac{1}{G_p} = \frac{L}{Cr} \quad (1-1-6)$$

则

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{Cr}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = G_p + jB \quad (1-1-7)$$

当容抗和感抗的大小相等即电路谐振时, 回路阻抗等于 R_p , 回路呈现纯电阻性, 此时



的频率为并联谐振频率 $\omega_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, R_p 称为并联谐振回路的谐振电阻。当 $\omega > \omega_0$ 时, 回路阻抗呈现电容性; 当 $\omega < \omega_0$ 时, 回路阻抗呈现电感性。谐振时, 回路两端的电压为最大值 V_0 , 相位 ϕ 是回路电压的相角, 谐振时为零。用并联谐振回路的谐振电阻 R_p 也可以表达品质因数 Q_p 。

$$Q_p = \frac{\omega_p C}{G_p} = \omega_p C R_p = \frac{\omega_p^2 C R_p}{\omega_p} = \frac{1}{LC} C R_p = \frac{R_p}{\omega_p L} \quad (1-1-8)$$

通常将串联谐振回路和并联谐振回路的品质因数都用 Q_0 表示。

谐振时, 流过电容支路的电流 I_{C_0} 与流过电感支路的电流 I_{L_0} 大小相等, 为信号源电流的 Q_0 倍, 且二者方向近似相反, 与信号源电流 I_S 的相位分别超前 90° 和滞后约 90° 。如果电感存在损耗, 则电感支路的电流 I_{L_0} 比信号源电流 I_S 的相位滞后小于 90° , 如图 1-6 所示, 所以并联谐振回路又被称为电流谐振。

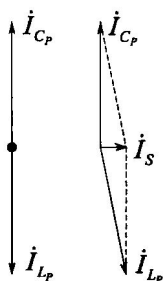


图 1-6 并联谐振回路谐振时的电流关系

LC 串并联谐振回路具有相同的归一化表达式, 常用 $\dot{\alpha} = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_0} = \frac{\dot{I}}{\dot{I}_0} = \frac{1}{1+j\xi}$ 表示归一化抑制

比, 其中 $\xi = Q_0(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})$, $\alpha = |\dot{\alpha}|e^{j\psi}$, 则 $|\dot{\alpha}| = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}}$, $\psi = -\arctan \xi$ 。谐振时, $\xi = 0$, $|\dot{\alpha}| = 1$

为最大值, 如图 1-7 所示的串并联回路的归一化抑制比曲线, 反映了当选频系统的中心频率与谐振回路的中心频率不同时特性的变化, 而且 Q 值越大, 曲线越尖锐。

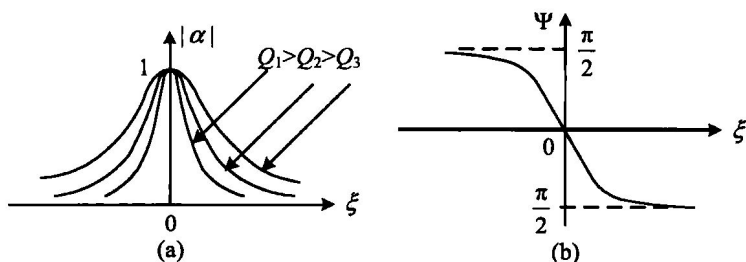


图 1-7 串并联谐振回路的归一化曲线

当串联谐振回路用于实际电路中时, 与之相接的信号源内阻和具有复数阻抗的内阻都会对谐振回路自身的品质因数有影响, 为了区别, 将回路自身的品质因数定义为空载品质因数用 Q_0 表示, 将连接了等效的信号源与负载的回路品质因数定义为有载品质因数, 用 Q_L 表示。

如果将信号源和复数阻抗中的电抗并入回路电抗，再设信号源内阻为 R_S ，负载电阻为 R_L ，则串联谐振回路的等效有载品质因数为

$$Q_L = \frac{\omega_0 L}{r + R_S + R_L} \quad (1-1-9)$$

当用电导表示 $G_S = \frac{1}{R_S}$ ， $G_L = \frac{1}{R_L}$ ， $G_p = \frac{1}{R_p} = \frac{Cr}{L}$ 时，并联谐振回路的有载品质因数为

$$Q_L = \frac{1}{\omega_0 L(G_p + G_S + G_L)} \quad (1-1-10)$$

工程上， Q_0 总是越大越好， Q_L 则可以由信号源内阻和负载阻抗决定。谐振回路中定义特性阻抗 $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ ，其大小决定了 Q_0 ， $Q_0 = \frac{\rho}{r}$ ，所以在 LC 回路中，电感 L 应有足够大的数值，例如当回路的谐振频率为兆赫兹数量级时，电感的单位一般为 μH ，电容的单位为 pF ，以保证足够大的特性阻抗，但电容的值也不易选得过小，否则易与分布电容相同而造成电路特性的不稳定。

上述的简单串并联 LC 回路可被看做是具有带通特性的选频网络，即带通滤波器。其 3dB 通频带定义为归一化抑制比的模下降 0.707 时的频带宽度，如图 1-8 所示。

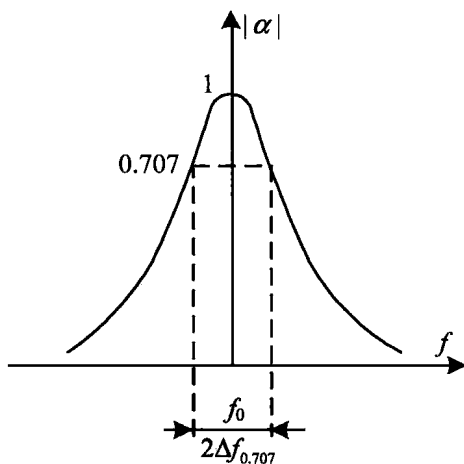


图 1-8 串并联谐振回路的通频带

考虑信号源和负载的影响后的广义失谐为

$$\xi = Q_L \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = Q_L \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) = Q_L \frac{(f - f_0)(f + f_0)}{f_0 f} = Q_L \frac{\Delta f \cdot 2f}{f_0 f} = Q_L \frac{2\Delta f}{f_0} \quad (1-1-11)$$

则通频带

$$2\Delta f_{0.707} = \frac{f_0}{Q_L} \quad (1-1-12)$$

谐振回路将选出有用信号抑制无用信号的能力称为回路选择性，选择性常采用矩形系数表示。按理想情况，谐振曲线应为一矩形，即在通带内放大量均匀，在通带外不需要的信号得到完全衰减，但实际上不可能。为了表示实际曲线接近理想曲线的程度，引入“矩形系数”，



它表示对邻道干扰的抑制能力。矩形系数

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} \quad (1-1-13)$$

$$K_{r0.01} = \frac{2\Delta f_{0.01}}{2\Delta f_{0.7}} \quad (1-1-14)$$

$2\Delta f_{0.1}$ 、 $2\Delta f_{0.01}$ 分别为放大倍数下降至 0.1 和 0.01 处的带宽， K_r 愈接近于 1 越好。

(2) 串并联谐振回路的应用

① 构成谐振回路的电感与电容

LC 串并联回路中的两个重要元件是电容和电感，电路设计者一般很少自制电容，但电感的自行绕制是较常见的。对于仅有一层导线的空心电感器而言，单层空芯线圈电感值的简化计算公式为

$$L = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l} \quad (1-1-15)$$

式中， L 是电感，单位是微亨 (μH)； d 是线圈的直径，单位是英寸 (1 英寸等于 2.54cm)； l 是线圈长度，单位是英寸； n 是线圈的匝数。该公式主要用于计算长度大于 $0.4d$ 的线圈的电感近似值，另外还证明，电感值随匝数的平方变化，如果匝数翻倍，那么电感值将是原来的 4 倍。求已知电感值的单芯线圈的匝数，可将公式 (1-1-15) 变形为

$$n = \frac{\sqrt{L(18d + 40l)}}{d} \quad (1-1-16)$$

例如：假设已知电感大小为 $10\mu\text{H}$ ，该电感的线圈直径为 1 英寸，长度为 1.25 英寸，则得到： $n = \frac{\sqrt{10(18 \times 1 + 40 \times 1.25)}}{1} = 26.1$ 匝，实际可取 26 匝。由于线圈长度为 1.25 英寸，所以每英寸上的匝数为 $26.1/1.25=20.9$ 。使用漆包线借助合适直径的物体缠绕所需匝数的线圈，然后调整线圈之间的距离，使之均匀分布于 1.25 英寸长度上即可。绕制好的空心线圈如图 1-9 所示。

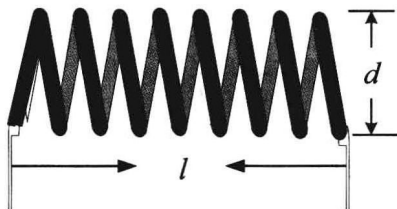


图 1-9 串并联谐振回路的通频带

高频电感线圈除了空心线圈还有磁芯线圈等，前者多用较粗铜线或镀银铜线脱胎绕成，或绕在空心塑料骨架上，后者多绕在带磁芯的塑料骨架上。带磁芯的线圈其电感量可以通过改变磁芯在线圈中的位置来进行调节。而空心线圈则必须增减匝数或匝距来进行调节。

还有一种小型固定高频线圈，也叫色码电感。它也是磁芯线圈之一，不过在绕制以后再用环氧树脂或塑料封装起来，在其外壳上标以色环或直接用数字标明电感量数值。这种电感的工作频率为 $10\text{kHz} \sim 200\text{MHz}$ 。电感量一般从 $0.1 \sim 33\,000\mu\text{H}$ 。用色码标示时其第一条色带表示电感量的第一位有效数字；第二条表示第二位有效数字；第三条表示乘以 10 的乘方数

(可以从 $10^0 \sim 10^9$)，单位是 μH ；第四条表示误差。固定电感器的另一种结构形式是在塑料或瓷架上绕成蜂房式结构，一般电感量在 $2.5 \sim 10\text{mH}$ 之间，称为高频扼流圈。

电感线圈的主要参数有电感量、品质因数 (Q 值)、标称电流、分布电容等。电感量是电感线圈的主要参数，电感量的大小与线圈圈数、绕制方式及磁芯的材料等因素有关。圈数越多，绕制的线圈越集中在一起，电感量越大；线圈内有磁芯的比无磁芯的电感量大，磁芯磁导率大的电感量大。品质因数 Q 是电感线圈的另一主要参数。 Q 值越高表明电感线圈的功率损耗越小，效率越高。用高 Q 值线圈与电容组成的谐振电路具有更好的谐振特性；用低 Q 值线圈与电容组成的电路，谐振特性将会变得不明显。一般线圈的 Q 值在几十至几百的数量级。电感线圈的 Q 值与线圈的结构（导线粗细、多股或单股、绕法、磁芯）有关，也和工作（或测试）频率有关，一般是频率越高 Q 值下降，所以线圈的 Q 值是指某一测试频率下的 Q 值。线圈的标称电流是指线圈允许通过电流的大小，应用时实际通过电感的电流不宜超过标称电流值。线圈的分布电容可以这样去理解：由于线圈每两圈（或每两层）导线可以看成是电容的两块金属片，这样，在获得电感量的同时，客观上就随之存在着一个小的电容。这一电容称为线圈的“分布电容”（或称寄生电容）。这个分布电容的存在，使线圈的工作频率受到限制，并使线圈的 Q 值下降。高频线圈的蜂房或分段绕法就是为减小分布电容而设计的。

电容是谐振电路中的另一个元件，与电感一样同样是储能元件，电路中的多种类型的电容根据电介质材料的不同分为：纸质、陶瓷、云母、聚酯等。陶瓷电容器广泛应用于旁路、退耦等 VHF 和 UHF 电路中，云母电容在调谐电路和其他高频应用中也有广泛的应用，在谐振电路中为了调整回路的谐振频率往往采用可变电容，可根据电容的变化范围和频率范围合理选择。

② 谐振回路可以作为阻抗匹配电路

并联谐振电路的一个很重要的作用是在射频功率放大器中作为阻抗匹配器。每一种类型的晶体管都有一个最合适的负载电阻值，并且每一种设备都需要特定的负载来决定应有的工作条件，现行设备将能量释放给负载，这个负载值可能比设备最佳运行时所需的负载值低，也可能现有负载比放大器所需最佳负载值高。将实际负载变为所需值的电路就是阻抗匹配电路。如图 1-10 所示电路是阻抗的串并联转换电路。

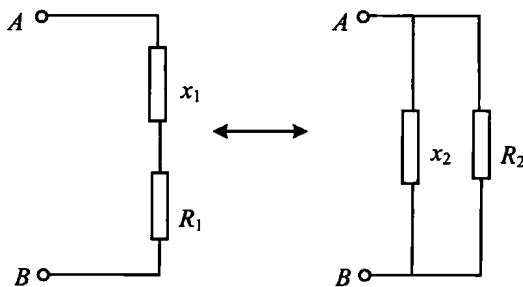


图 1-10 阻抗的串并转换电路



已知:

$$R_1 + jX_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{jX_2}} = \frac{R_2 jX_2}{R_2 + jX_2} = \frac{R_2 X_2^2}{R_2^2 + X_2^2} + j \frac{R_2^2 X_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (1-1-17)$$

则

$$R_1 = \frac{R_2 X_2^2}{R_2^2 + X_2^2}, \quad X_1 = \frac{R_2^2 X_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (1-1-18)$$

已知, $Q_L \gg 1$ 时,

$$\frac{X_1}{R_1} = \frac{R_2}{X_2} = Q_L \quad (1-1-19)$$

$$R_2 = Q_L^2 R_1, \quad X_2 \approx X_1 \quad (1-1-20)$$

这个结果表明: 串联电路转换成等效并联电路后, 电抗 X_2 的性质与 X_1 相同, 在 Q_L 较高的情况下, 其电抗 X 基本不变, 而并联电路的电阻 R_2 比串联电路的电阻 R_1 大 Q_L^2 倍。串联形式电路中的电阻愈大, 则损耗愈大; 并联形式电路中的电阻愈小, 则分流愈大, 损耗也愈大, 反之亦然, 所以两种电路是完全等效的。

应用以上公式, 可知如图 1-11 所示电路的阻抗变换关系为

$$|Z_{ab}| = Q_L^2 r = \frac{\omega_0^2 L_1^2}{r^2} r = \frac{1}{LC} \frac{L_1^2}{r} = \left(\frac{L_1}{L}\right)^2 \frac{L}{Cr} = P^2 R_p = P^2 |Z_{ab}| \quad (1-1-21)$$

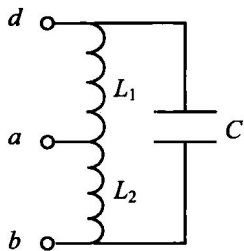


图 1-11 电感部分接入的阻抗变换

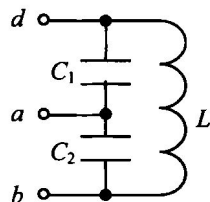


图 1-12 电容部分接入的阻抗变换

式中, P 称为接入系数, $P = L_2 / (L_1 + L_2)$, 可见由 ab 端看进去的阻抗 Z_{ab} 与由 db 端看进去的阻抗 Z_{db} 可以通过调节 P 而有不同的变换关系, 原 LC 回路两端阻抗 Z_{db} 变至 ab 两端后, 阻抗变小了 P^2 倍。如图 1-12 所示的电容器接入的阻抗变换, 同样满足式 (1-1-21) 的变换关系, $|Z_{ab}| = P^2 |Z_{db}|$, 只是接入系数 $P = C_1 / (C_1 + C_2)$ 。

图 1-13 (a) 是一个 Π 型匹配网络, 它可以将左端的 R_p' 经过电抗 LC 网络变为右端的 R_L 。图 1-13 (b) 是一个 T 型匹配网络, 它也可以将左端的 R_p' 经过电抗 LC 网络变为右端的 R_L 。

在实际应用中, 例如天线的阻抗包含电阻和电抗部分, 是一个复杂阻抗, 有时我们需要将其变为纯电阻性阻抗。但当送到天线上的信号频率与谐振频率不同时, 会呈现电感性或电容性, 为了将其变为纯电阻性源, 需在天线与后级电路之间加入匹配网络, 匹配网络的阻抗必须等于天线阻抗的复阻抗的共轭, 即当天线呈现电感性阻抗时, 匹配网络阻抗呈现与之大小相等方向相反的电容性阻抗, 如天线阻抗为 $R + jX$, 则匹配网络阻抗应为 $R - jX$, 若天线阻抗为 $R - jX$, 则匹配网络阻抗应为 $R + jX$ 。