



普通高等院校电子信息类应用型规划教材

高频电子线路

主编 黄翠翠 叶 磊



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

普通高等院校电子信息类应用型规划教材

高频电子线路

主 编 黄翠翠 叶 磊

参 编 陈 容 付 璠 侯自良

孙利华 田 磊 王立谦

熊年禄 余良俊

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是为高等学校电子信息类相关专业编写的一本专业课基础教材。结合无线通信系统的组成结构,本书共分为7章,分别介绍了选频和滤波电路、高频小信号放大器、高频功率放大器、高频振荡器、振幅调制解调及混频电路、角度调制与解调和反馈控制电路。各章附有练习题。

本书可作为高等学校电子信息类专业“高频电子线路”课程的教材和参考书。舍去某些章节后,也可作为夜大、函授、自学考试等大专班的教材,还可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/黄翠翠,叶磊主编.--北京:北京邮电大学出版社,2009.12

ISBN 978-7-5635-1985-9

I. ①高… II. ①黄…②叶… III. ①高频—电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 234727 号

书 名: 高频电子线路

主 编: 黄翠翠 叶 磊

责任编辑: 艾莉莎

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 12.25

字 数: 293 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1985-9

定 价: 22.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

本书是为高等学校电子信息类相关专业编写的一本专业课基础教材。编写过程中,作者根据近代无线电通信技术的发展现状和研究成果,基于课堂教学和实践教学经验,汲取国内外相关教材特色,在原教学讲义的基础上修改编著而成。本书深入浅出,突出基本概念、基本理论和基本分析方法,以经典分立元件电路分析为基础,减少了对有关章节的烦琐推导,直接引用结论,强调通信系统的整机概念,注意培养学生分析高频电子线路的方法和读图能力。

本书主要内容包括选频和滤波电路、高频小信号放大器、高频功率放大器、高频振荡器、振幅调制解调及混频电路、角度调制与解调和反馈控制电路。全书以绪论为主线,在介绍基本无线通信传输系统原理的基础上,分章节展开对各种功能电路的分析研究。在分析过程中,重点研究其工作原理、典型电路和分析方法,对类似电路找出共性,用以指导对各种具体电路的分析。书中*部分为选修部分。

本书可作为普通高等院校电子信息工程、通信工程、无线电技术和相近专业的高频电子线路、非线性电子线路及通信电子线路或相近课程的本科教材,也可作为工程技术人员的参考书。书中内容经取舍后,也可用做上述专业的专科、高等职业学校或成人教育的教材。

中国地质大学(武汉)江城学院黄翠翠、叶磊老师任本书主编,负责全书统稿、修订工作。本书中绪论、第3章及附录部分由黄翠翠老师编写;第1,4,5,7章分别由江城学院王立谦、付璠、陈容、孙利华老师编写;第2章由河南工业职业技术学院田磊老师编写;第6章由江城学院余良俊、叶磊老师编写;江城学院侯自良、熊年禄老师对全书进行了认真审阅,并提出许多宝贵意见,在此表示感谢。

限于编者水平,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第 1 章 选频和滤波电路	6
1.1 概述	6
1.2 LC 选频网络	7
1.2.1 选频网络的基本特性	7
1.2.2 LC 串并联谐振回路的基本特性	8
1.2.3 LC 串并联谐振回路的选频特性	11
1.2.4 激励源内阻及负载对回路的影响	12
1.3 回路的阻抗变换	13
1.3.1 串并联回路的阻抗等效互换	13
1.3.2 回路部分接入的阻抗变换	14
1.4 耦合回路	16
1.4.1 耦合回路的概念	16
1.4.2 耦合回路的频率特性	17
1.5 滤波电路	19
1.5.1 石英晶体滤波器	20
1.5.2 陶瓷滤波器	21
1.5.3 声表面波滤波器	23
习题	25
第 2 章 高频小信号放大器	27
2.1 概述	27
2.2 晶体管高频小信号等效模型	28
2.2.1 Y 参数等效电路	29
2.2.2 共发射极混合 π 型等效电路	29
2.2.3 Y 参数与混合 π 参数间的关系	32
2.3 谐振放大器	33
2.3.1 单调谐回路放大器	33
2.3.2 多级单调谐放大器	36

2.3.3* 双调谐回路放大器	38
2.3.4* 参差调谐回路放大器	40
2.3.5 调谐放大器的稳定性	41
2.4 宽频带放大器	42
2.4.1 宽带放大器的主要特点	43
2.4.2 扩展通频带的方法	43
2.5 电噪声	44
2.5.1 噪声的来源和特点	44
2.5.2 噪声系数	47
2.5.3 降低噪声系数的措施	49
习题	50
第3章 高频功率放大器	53
3.1 概述	53
3.2 谐振功率放大器的工作原理	54
3.2.1 电路的组成及特点	54
3.2.2 电路工作原理及性能指标	55
3.3 高频功率放大器的动态分析	58
3.3.1 动态特性	58
3.3.2 负载特性	59
3.3.3 调制特性	62
3.3.4 放大特性	63
3.4 高频功率放大器实际电路	64
3.4.1 直流馈电电路	64
3.4.2 匹配网络	66
3.4.3 高频功率放大器的实际电路	69
3.5 宽带高频功率放大器	70
3.5.1 传输线变压器	70
3.5.2 宽带功率放大电路实例	74
3.5.3 功率合成与分配	74
习题	77
第4章 高频振荡器	79
4.1 概述	79
4.2 反馈振荡器的原理和分析	79
4.2.1 起振条件	80
4.2.2 稳定条件	82
4.3 LC正弦波振荡器	83
4.3.1 互感耦合型LC振荡电路	83

4.3.2 三点式振荡电路	85
4.4 振荡器的频率稳定度	92
4.4.1 频率稳定度的定义	92
4.4.2 影响频率稳定度的因素	94
4.4.3 振荡器的稳频措施	96
4.5 晶体振荡器	97
4.5.1 石英晶体谐振器的性能分析	97
4.5.2 晶体振荡器	99
4.6 压控振荡器	102
4.6.1 变容二极管	102
4.6.2 变容二极管压控振荡器	103
4.6.3 晶体压控振荡器	104
习题	105
第5章 振幅调制、解调及混频电路	108
5.1 概述	108
5.2 振幅调制信号分析	109
5.2.1 标准振幅调制(AM)信号	109
5.2.2 双边带调制(DSB)信号	112
5.2.3 单边带调制(SSB)信号	113
5.2.4 残边带调制(VSB)信号	114
5.3 振幅调制电路	114
5.3.1 低电平调幅电路	115
5.3.2 高电平调幅电路	119
5.4 调幅信号的解调电路	120
5.4.1 小信号平方律检波	121
5.4.2 大信号包络检波	122
5.4.3 同步检波	125
5.5 混频电路	126
5.5.1 混频器原理	126
5.5.2 混频器的主要性能指标	128
5.5.3 实用混频电路	129
5.5.4 混频器的干扰	132
5.6 集成 AM 接收机	134
习题	135
第6章 角度调制与解调	136
6.1 概述	136
6.2 调角信号的分析	136

6.2.1 频率调制(FM)信号	136
6.2.2 相位调制(PM)信号	138
6.2.3 调角波的频谱与频谱宽度	139
6.3 角度调制电路	142
6.3.1 实现调频、调相的方法	142
6.3.2 调频电路	143
6.4 调频波的解调原理及电路	147
6.4.1 调频波的解调方法	147
6.4.2 振幅鉴频器	148
6.4.3 相位鉴频器	150
6.4.4 脉冲计数式鉴频器	153
6.5 调频制的特殊电路	154
6.5.1 限幅电路	154
6.5.2 预加重与去加重电路	155
6.6 集成调频发射机	156
6.7 集成调频接收机	157
习题	158
第7章 反馈控制电路	161
7.1 概述	161
7.2 自动增益控制(AGC)电路	162
7.2.1 AGC 电路的工作原理	162
7.2.2 AGC 电路的应用	164
7.3 自动频率控制(AFC)电路	165
7.3.1 AFC 电路的工作原理	165
7.3.2 AFC 电路的应用	166
7.4 锁相环路	167
7.4.1 锁相环路的构成	167
7.4.2 锁相环路的工作原理	168
7.4.3 锁相环路的应用	172
7.5 集成锁相环举例	174
习题	177
参考答案	179
附录 余弦脉冲分解系数表	182
参考文献	185

绪论

EXORDIUM

从古至今,信息的交换与传递一直都是人类社会生活的重要组成部分。1837年,由美国 S. F. B. 莫尔斯首次试验成功利用电磁波作载体,通过编码和相应的电处理技术实现人类远距离传输与交换信息的通信方式,开启了电子通信的篇章。自此后,通信技术飞速发展,出现了形形色色的通信工具和通信系统,对人类的生活和生产起了非常重要的作用。

高频电子线路是无线电设备、通信系统中的重要组成部分,几乎涵盖了信号传送和接收所有的单元电路。

一、通信系统的组成

通信的任务是传递信息。传输信息的系统称为“通信系统”。任何一个通信系统,都是从一个点向另一个点传送信息。通信系统是指实现这一传输过程的全部设备和信道的总和。

通信系统种类很多,但无论它们的具体组成和业务功能有何区别,都可以概括为 5 个基本模块,如图 0.1 所示。

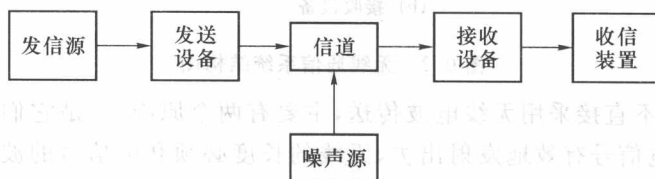


图 0.1 通信系统组成模型

发信源是将需要传送的原始信息源,如语言、音乐、图像、文字等(一般是非电物理量),经输入变换器后转换成电信号(如被传输的是声音信息就需先经声电换能器——话筒,变换为相应信号的电信号),称为基带信号。如果输入信息本身就是电信号,可以直接送到发送设备;基带信号的形式不一定适合在信道上传输,需将基带信号送入发送设备,将其变换成适合于信道传输特性的信号,再送入信道。

信道是指信号传输的通道,包括有线信道和无线信道。信道不同,其传输特性也不一

样。有线信道包括架空明线、同轴电缆、波导管和光缆等；无线通信系统中，信道主要指大气层或外层空间。由于无线电波在空间传播的性能和大气结构、高空电离层结构、大地的衰减以及无线电波的频率、传播路径等因素密切相关，因此，不同频段无线电波的传播路径及其受上述各种因素的影响程度也不同。信号在信道的传输过程中，不可避免地要受到干扰，如工业干扰、天电干扰等。信号传送到接收端后，接收设备把有用信号从众多信号和噪声中选取出来，经输出变换器恢复出原始信息，供收信者使用。

通信系统根据信道的不同可以分为有线通信系统和无线通信系统。如图 0.2 所示为一个传输音频信号的无线通信系统。其中，图 0.2(a)是发送设备的组成框图。它主要包括高频(振荡器、倍频器、高频功放、调制)电路和低频电路。图 0.2(b)是接收设备的组成框图。

图 0.2 中，振荡器的作用是产生频率稳定的高频载波信号，为了提高频率稳定度，通常采用石英晶体振荡器，并在其后加以缓冲级，以减小后级对它的影响。一般晶体振荡器的振荡频率不太高，达不到载波所要求的频率 f_c ，因而在缓冲级后需加若干级倍频器，将频率提高到所需频率 f_c 上。在图 0.2(b)所示接收机中，由于对振荡信号的频率稳定度要求高，故振荡信号常常由频率合成电路提供。高频功率放大器的主要作用是把信号放大到足够的功率，由发射天线将高频已调信号辐射出去。

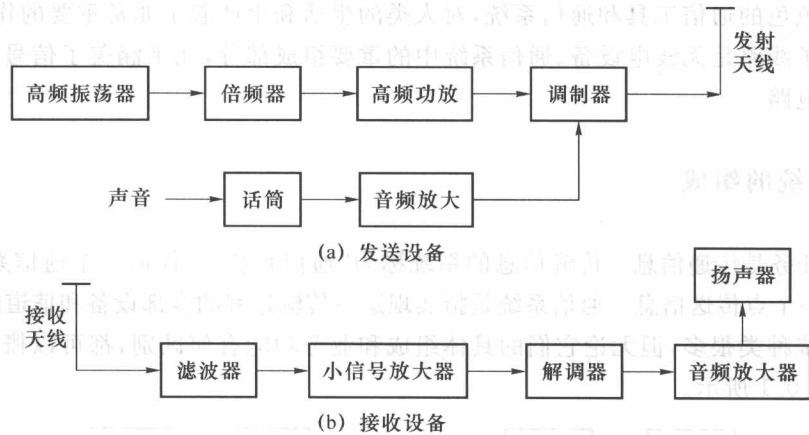


图 0.2 无线通信系统结构图

基带信号通常不直接采用无线电波传送，主要有两个原因：一是它们的频率较低、波长较长，而要将无线电信号有效地发射出去，天线的长度必须和电信号的波长为同一数量级，否则不能通过天线有效地发送信息；二是各信号的频谱分布几乎在同一频率范围，如果直接把反映原始信息的电信号通过天线以辐射电磁波的方式传送，信道无法保证同时传送两路以上的信息而又互不干扰，同时也不便于接收端正确分离两路以上的信息。因此，必须把要传送的电信号设法分开，重要的方法之一是利用调制器将欲传送的基带信号加载(调制)到某一特定频率的高频电振荡(称为载波)信号上，载有基带信息的高频振荡信号称为已调信号，也称为频带信号。通过天线辐射出高频电磁波，将信息传送到接收机。再由接收机中的解调器将已调信号中的基带信号解调出来。

从原理上看，调制过程的实质是一个由调制信号去控制高频载波信号的某一参数，使该

参数按照调制信号的规律变化的过程。而高频载波信号(电压或电流)的振幅、频率、相位 3 个参数可被调控,与之对应的可实现 3 种基本模拟调制,分别是振幅调制(AM)、频率调制(FM)和相位调制(PM)。

二、信号的描述方式

通信系统的工作对象是信号。信号是所传输信息的载体。要对高频通信电路进行研究,必须要确切地描述出传输在电路各个部分信号的所有特征。在实际应用中,可能遇到的信号是多种多样的,但所有的信号都具备最基本的 3 个参数,即幅度、频率和相位。

根据描述变量的不同,信号的描述方法可分为两种:时域描述和频域描述。

1. 时域描述法

时域描述是以时间 t 为变量研究信号幅值、频率和相位变化的描述方法,可以用时域波形图和表达式来表示。如图 0.3 所示,横轴代表时间变量 t ,纵轴代表各信号在不同时间的大小。信号 $a(t)$ 为直流信号,其大小为定值 A ,即幅值为 A ,频率和相位皆为 0,故 $a(t) = A$;信号 $b(t)$ 为周期正弦信号,由图 0.4 可以得出,其幅值为 B ,周期为 T ,初相为 $\pi/2$,故可写出其表达式为 $b(t) = B\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \frac{\pi}{2}\right)$,根据该表达式可以得出该信号在 t 取不同值时相对应的幅度、频率及相位值的变化情况;而信号 $c(t)$ 为一非周期信号,其幅值、频率及相位的变化情况与时间 t 并无明显的联系,且由于 t 的取值范围通常可以从 $-\infty$ 到 $+\infty$,所以可以预见要写出其时域表达式或画出其完整波形是一项非常复杂的工作,这对于信号的分析是十分不利的。在这种情况下,就需要用第二种描述法,即频域描述法。

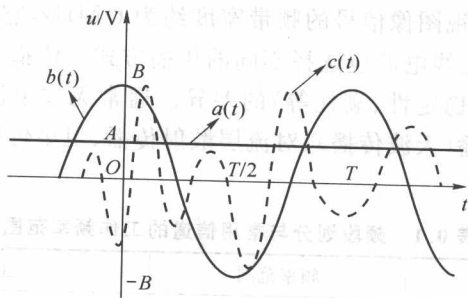


图 0.3 时域波形图

2. 频域描述法

频域描述是以频率 f (或角频率 ω)为变量研究信号幅值、频率和相位变化的描述方法,可以用频谱图和频域表达式来表示。对于图 0.3 中的直流信号 $a(t)$ 来说,由于其频率,故其表达式可写为 $A(f) = A(f=0 \text{ Hz})$,其频谱图如图 0.4(a)所示,其中横轴为频率 f ,纵轴为信号幅值;对于正弦信号 $b(t)$ 来说,由于其频率为定值 $1/T$,表达式可写为 $B(f) = B(f = 1/T)$,其频谱图如图 0.4(b)所示;而对于复杂信号来说,根据正弦信号和复杂信号的内在联

系,可以将其分解为许多不同频率的正弦信号之和,再利用频谱图显示各频率分量在频谱图中的分布情况,就可以直观地反映信号的频率组成及其特点。例如,对于语音信号,其频率范围在几百 Hz 到几 kHz 之间。如果规定在电话通信中从 300~3 400 Hz 为一个话路,则一般通话的主要频率成分就分布在该频率范围内,如图 0.4(c)所示。其中,语音信号中各频率成分连续变化,频带宽度约为 3 100 Hz。

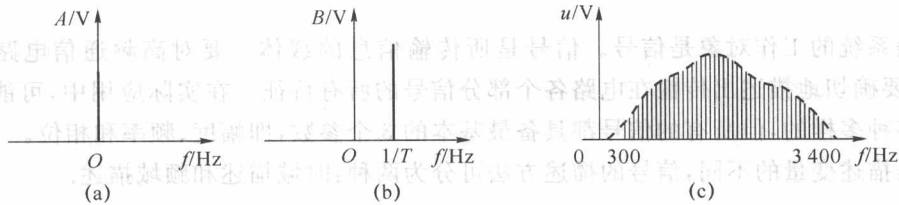


图 0.4 频谱图

三、无线电波的传播特性

无线电波在空间的传播速度与光速相同,约为 3×10^8 m/s。无线电波的波长、频率和传播速度的关系满足 $\lambda = c/f$, 式中, λ 为波长, c 为传播速度, f 为频率。

由于电波的传播速度固定不变,所以信号频率越高,波长越短。

不同波长的无线电波传播规律不同,应用范围也不同,通常把无线电波划分为不同的波段。无线电波频段的划分如表 0.1 所示。任何载有消息的无线电波都占据一定的频带。频率越高,可利用的总频带(或称波段)就越宽,因此,利用高频已调波可在同一波段同时传送多个不同的信息。另外,某些频带很宽的原始信息(如雷达信号、电视图像、多路语音)只能在高频率上传输。例如,电视图像信号的频带宽度约为 6 MHz,它适宜在几十 MHz 以上的频率上传输。不同波段的无线电波应选择不同的传播方式。传播方式的不同决定了传播的距离和传播特性(如信号的稳定性、衰耗等)的差异。通常无线电波的传播方式主要有视距传播、地波传播、电离层传播(天波传播)、对流层散射传播、卫星传播及散射传播等,如图 0.5 所示。

表 0.1 频段划分与常用信道的工作频率范围

波段名称	波长范围	频率范围	主要传播方式和用途
长波	1 000~10 000 m	30~300 kHz	地波、较远距离通信
中波	100~1 000 m	300~3 000 kHz	地波、天波,广播、通信、导航
短波	10~100 m	3~3 MHz	地波、天波,广播、通信
超短波	1~10 m	30~300 MHz	视距传播、对流层散射,通信、电视、雷达
分米波	10~100 cm	300~3 000 MHz	视距传播、对流层散射,通信、电视、雷达
厘米波	1~10 cm	3~30 GHz	视距传播、对流层散射,通信、电视、雷达
毫米波	0.1~1 cm	30~300 GHz	视距传播、对流层散射,通信、电视、雷达

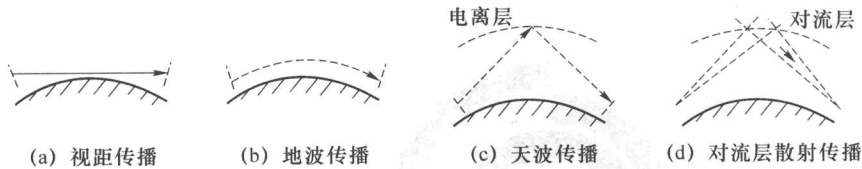


图 0.5 无线电波的几种传播方式

显然,对各种无线电通信系统,尽管它们在传递信息形式、工作方式及设备体制等方面有所不同,但设备中所包含的对高频信号的产生、接收及检测处理的基本电路大都是相类似的,这些电路统称为高频电子线路。可见,高频电子线路是随着无线电通信手段的出现而出现,且随着通信容量的不断增大、使用的频率不断提高而发展。高频电子线路的各种功能电路的组成及性能则随微电子技术的发展而发展。它经历了电子管电路、晶体管电路和集成电路 3 个重要阶段。目前高频电路和模拟电路、数字电路一样,电路的集成度越来越高,各种高频集成电路新器件不断问世,应用越来越广泛,计算机技术也在高频电子线路中得到了应用。高速 DSP(数字信号处理器)结合 MCU(微处理器),把传统的模拟高频电信号变成数字信号进行处理,使得现代无线电信号的处理速度更快,通信质量更高。

本书将结合无线电通信电路,以集成电路为主线,从分立元件电路入手,分析高频电路中的基本单元电路的组成及工作原理;并根据目前高频集成电路的发展,尽可能多地介绍高频集成电路的特性及其典型应用电路。

第1章

选频和滤波电路

1.1 概述

无线电信号有不同波段,它们的频率相差很大,用途也各不相同。例如,调幅广播中波的频率范围为 $526.6\sim 1\,606.5\text{ kHz}$,调幅广播短波的频率范围为 $2\sim 18\text{ MHz}$,调频广播长波的频率范围为 $87\sim 108\text{ MHz}$ 。无线电视广播分为4个波段,I波段频率范围为 $48.5\sim 92\text{ MHz}$,Ⅲ波段频率范围为 $165\sim 223\text{ MHz}$,Ⅳ波段频率范围为 $470\sim 566\text{ MHz}$,V波段频率范围为 $606\sim 958\text{ MHz}$ (注: $92\sim 165\text{ MHz}$ 的频率范围称为Ⅱ波段,该波段没有用于无线电视广播,而是用于其他无线电通信)。移动通信有 900 MHz 频段和 $1\,800\text{ MHz}$ 频段等。要选择所需要的某一波段或频段的信号来接收,首先就要选频和滤波。

携带有用信息的高频已调波信号的特点是频率高,相对频带宽度较窄。以调幅广播中波为例,其频率范围规定为 $526.6\sim 1\,606.5\text{ kHz}$,频道间隔规定为 9 kHz ,信号的相对频带宽度为 $1/58\sim 1/178$ (此处以频道间隔代替频带宽度计算)。按以上频率范围和频道间隔的规定,在调幅广播中波波段可以设置110多个广播电台(为避免邻近电台相邻频率的干扰,某地区实际可按收中波广播数远少于此数)。又如我国无线电视广播分为4个波段,共68个频道(为避免邻近电视台相邻频道的干扰,某地区实际可接收无线视频道数少于此数),要从多个高频信号中选取需要接收的信号,选频和滤波电路不可缺少。

LC谐振回路是最常用的选频网络,它有串联回路和并联回路两种类型。

用LC谐振回路的选频特性,可以从输入信号中选出有用频率信号而抑制无用频率信号。例如用在接收机的输入回路和选频放大器中。LC回路还可进行频幅和频相转换,如用在鉴频器电路中。此外LC回路还可组成阻抗变换电路用于级间耦合和阻抗匹配。所以LC谐振回路是高频电路中不可缺少的组成部分。

传统广播接收机的输入回路,常由电感线圈和可变电容器组成LC谐振回路,靠手转动可变电容器改变电容量来选择不同信号频率。为实现自动调谐选台,现已使用变容二极管

代替可变电容器来调谐选台,这在电视机的电调谐高频中已广泛使用。

在整机生产中为了减少人工调谐的麻烦,陶瓷滤波器、石英晶体滤波器和声表面波滤波器已广泛使用,它们常用做集中滤波器,在集成电路选频放大和信号选取分离上起着重要作用。

1.2 LC 选频网络

1.2.1 选频网络的基本特性

所谓选频,实际上是允许特定信号不失真通过,而其他信号不能通过。利用频域分析法进行分析,假设输入信号为 $\dot{U}_i(\omega)$, 输出信号为 $\dot{U}_o(\omega)$, 而选频网络传输特征函数为 $\dot{H}(\omega)$, 则有: $\dot{U}_o(\omega) = \dot{H}(\omega)\dot{U}_i(\omega)$ 。若要求该选频网络能够令频率在 $\omega_1 \sim \omega_2$ 之间的信号无失真通过,而超出该频率范围的信号不能通过,则必须满足以下条件

$$|\dot{H}(\omega)| = \begin{cases} H(\omega_0) & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 0 & \omega < \omega_1, \omega > \omega_2 \end{cases}$$

其幅频曲线如图 1.1 中实线所示,这就是理想选频特性。而在现实情况下选频特性是达不到理想状态的,实际选频特性曲线如图 1.1 中虚线所示。衡量选频网络性能的指标主要有两个,即通频带和选择性。

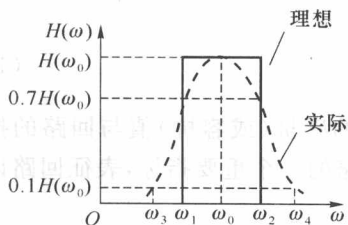


图 1.1 选频电路的幅频特性

1. 通频带

通频带定义为传输函数的值比最大值下降 3 dB 或下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ 时的上限截止频率与下限截止频率之差,用 $BW_{0.7}$ 表示,如图 1.1 所示。实际工作时,为了不失真地通过有用信号,要求选频网络的通频带应大于有用信号的频谱宽度,即容许输入信号总能正常通过电路。

2. 选择性

选择性表示选频网络对通频带以外的各种干扰信号及其噪声的滤除能力,或者说,从各种干扰中选出有用信号的能力。理想条件下,选频网络应该对通频带以内的各种信号频谱分量具有相同的线性作用,而对通频带以外的信号则应完全抑制。为了评价实际幅频特性曲线接近理想矩形的程度,我们引入矩形系数 $K_{0.1}$ 来表示,其定义为

$$K_{0.1} = BW_{0.1} / BW_{0.7} \quad (1.1)$$

其中, $BW_{0.1}$ 是 $H(\omega)$ 的值下降到最大值的 0.1 倍时的频带宽度, $BW_{0.1}$ 和 $BW_{0.7}$ 之间的频率范围称为过渡带。 $K_{0.1}$ 的大小是衡量信号能通过的频宽与能正常放大的频宽之比,它间接

反映了过渡带与通频带的频宽比。 $K_{0.1}$ 越小,过渡带越窄,选择性越好。理想情况的 $K_{0.1}$ 等于 1,实际情况总是大于 1 的。

1.2.2 LC 串并联谐振回路的基本特性

1. LC 串联谐振回路的基本特性

在 LC 谐振回路中,当信号源与电容和电感及负载串接时,就组成串联谐振(series resonance)回路,如图 1.2 所示,其中 R_L 是负载电阻, r 是电感 L 的损耗电阻。

由电路原理知识,可得出串联谐振回路总阻抗为

$$\dot{Z}_s = R_L + r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1.2)$$

在某一特定频率 ω_0 时,回路电抗为 0,串联谐振回路阻抗为一纯电阻,这种现象被称为谐振。一般把 ω_0 称为串联谐振回路的固有谐振角频率。此时,回路总阻抗为最小值,回路电流达到最大值。由回路电抗

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

得谐振角频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.3)$$

由于 $\omega_0 = 2\pi f_0$,可得谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.4)$$

当回路发生谐振时,即 $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$ 。把回路谐振时的感抗(或容抗)值与回路的损耗电阻之比定义为回路的品质因数,以 Q 表示。它是谐振回路的一个重要指标,表征回路谐振状态下电抗元件的储能与电阻元件耗能状况的比值。

当不考虑回路负载 R_L 时,品质因数被称为空载品质因数,为

$$Q_0 = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.5)$$

考虑回路包括负载在内的所有损耗电阻时,品质因数被称为有载品质因数,为

$$Q_L = \frac{\omega_0 L}{R_L + r} = \frac{1}{\omega_0 C (R_L + r)} \quad (1.6)$$

若不考虑回路负载,在输入电压的作用下,流过回路的电流为

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

谐振时空载回路电流为

$$\dot{i}_0 = \frac{\dot{U}_s}{r}$$

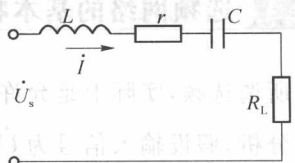


图 1.2 LC 串联谐振回路

则电感 L 和电容 C 两端电压分别为

$$\dot{U}_L = j\omega L \cdot \dot{I}_0 = j\omega L \frac{\dot{U}_s}{r} = jQ_0 \dot{U}_s$$

$$\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \cdot \dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_s}{j\omega Cr} = -jQ_0 \dot{U}_s$$

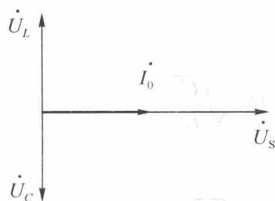


图 1.3 电感、电容电压相位关系

可见,此时电感 L 和电容 C 两端电压大小相等,方向相反,其相位关系如图 1.3 所示。因此,串联谐振也叫电压谐振。

图 1.4 显示了空载 LC 串联回路的阻抗频率特性。由图可知,当输入信号频率等于回路的谐振频率时,即 $\omega = \omega_0$,回路的阻抗值最小,等于纯电阻 r ;当 $\omega \neq \omega_0$,则阻抗的模将增大,回路将呈现容抗特性或感抗特性,相角趋向于 $\pi/2$ 或 $-\pi/2$ 。

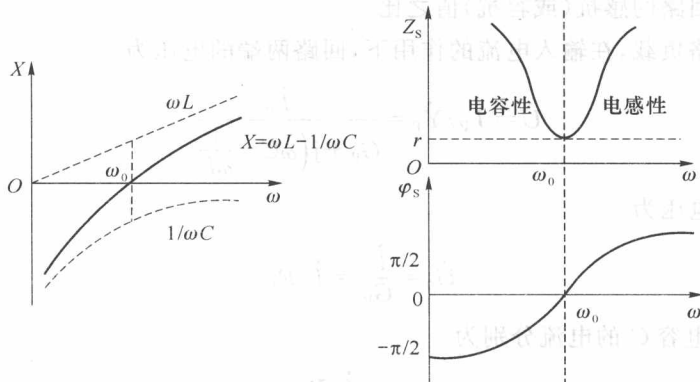


图 1.4 串联谐振回路的阻抗频率特性

2. LC 并联谐振回路的基本特性

当信号源与电感和电容并联时,就构成并联谐振回路,如图 1.5 所示。图 1.5(a)中 R_L 是负载电阻, r 是电感 L 的损耗电阻,数值较小,通常都满足 $\omega L \gg r$ 的条件,因此有

$$\dot{Z}_p = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} / R_L \approx \frac{L/C}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} / R_L = \frac{1}{\frac{rC}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} / R_L$$

由此可将图 1.5(a)转换为图 1.5(b)用导纳分析较为方便,其中 R_p 即为 r 的等效谐振电阻,且 $R_p = L/rC$ 。

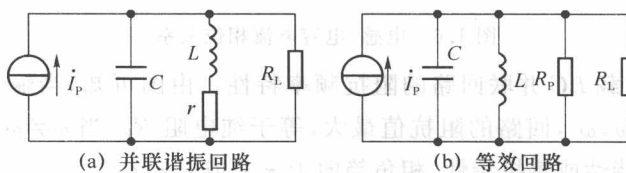


图 1.5 LC 并联谐振回路