

24

7-111-20
16.6

高频电子线路 学习与解题指导

阳昌汉 主编

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路学习与解题指导/阳昌汉主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2002. 3
ISBN 7-81073-248-X

I. 高... II. 阳... III. 高频-电子电路-高等学
校-教学参考资料 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 001450 号

内 容 简 介

本书是“高频电子线路”课程的教学辅导书。本书包括高频小信号调谐放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制电路、调幅信号的解调电路、角度调制电路、调角信号的解调电路和变频电路等各章节的重点与难点分析说明,典型例题的分析计算和思考题与习题的参考解答。

本书是阳昌汉主编的“高频电子线路”教材的配套辅导书。除了对各章节的重点、难点进行了分析说明,还针对学生难于理解与掌握的内容以典型例题进行分析计算。并对全书的思考题与习题给出了参考解答。本书可作为电子信息、通信类专业学习本课程的本科生的教学辅导书,也可以作为研究生入学考试的辅导书。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈工程大学11号楼
发行部电话:(0451)2519328 邮编:150001
新华书店经销
肇东粮食印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 15.25 字数 364 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~5 000 册

定价:19.00 元

前 言

“高频电子线路”是电子信息和通信等类专业的一门重要的技术基础课程,是一门工程性和实用性很强的课程。课程的主要内容是通信系统中的发射机和接收机的有关高频功能电路。它包含有高频小信号调谐放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制电路、调幅信号的解调电路、角度调制电路、调角信号的解调电路和变频电路等内容。课程中主要讨论这些高频功能电路的功能以及实现这些功能的基本原理和方法。这些都是电子信息和通信系统中的重要组成部分和理论基础。课程中所讨论的电路主要是非线性电子线路,其显著特点是基本概念多、涉及电路形式多,而且要求具有较宽的基础知识,其分析方法又是非线性分析方法。这些对理解和掌握高频功能电路的功能、基本理论及实现方法带来了较大的困难。特别是在讲课学时较少的情况下,非常需要有一本帮助指导学生学习高频电子线路课程的辅导书以及典型例题和习题解答。为此,编者根据自己多年从事高频电子线路课的教学实践,针对教学中的重点和难点以及学习中普遍存在的问题,编著了这本教学辅导书,期望能对学生学好这门课,提高自学分析能力有所帮助。

本书是阳昌汉主编的“高频电子线路”教材的配套辅导书。每章的内容分为重点与难点、典型例题分析和思考题与习题参考解答三部分。目的是作为学习本课程的学生的参考指导书。帮助学生学好高频电子线路课,较好地掌握解题思路和解题技巧,为将来从事电子系统开发工作打下坚实基础。

本书由阳昌汉主编,谢红参编。第一章、第二章和第四章由谢红编写,其余章由阳昌汉编写。

限于编者水平,书中不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 重点与难点	1
一、高频电子线路课的研究对象	1
二、无线电发送设备的组成与原理	1
三、无线电接收设备的组成与原理	3
第二节 本课程的说明	4
一、本课程的分析与讨论范围	4
二、本课程的非线性电子线路分析	4
三、关于功能电路的功能	4
第三节 思考题与习题参考解答	5
第二章 高频小信号放大器	6
第一节 重点与难点	6
一、高频小信号放大器的功能、分类与技术指标	6
二、分析小信号放大器的基础知识	7
三、晶体管高频小信号等效电路	9
四、晶体管谐振放大器	11
五、小信号谐振放大器的稳定性	14
第二节 典型例题分析与计算	17
第三节 思考题与习题参考解答	25
第三章 高频功率放大器	39
第一节 重点与难点	39
一、高频功率放大器的功能	39
二、丙类高频功率放大器的组成及基本原理	39
三、晶体管特性曲线的理想化及其解析式	40
四、集电极余弦电流脉冲的分解	41
五、高频功率放大器的功率与效率	42
六、高频功率放大器的动态特性	43
七、高频功率放大器的负载特性	46
八、 V_{cc} 、 V_{bb} 、 U_{bm} 分别变化对工作状态的影响	47
九、高频功率放大器临界工作状态的计算	51
十、谐振功率放大电路	52
第二节 典型例题分析与计算	54
第三节 思考题与习题参考解答	63
第四章 正弦波振荡器	76
第一节 重点与难点	76

一、反馈型振荡器的振荡原理	76
二、振荡电路	79
三、振荡电路的稳频原理	86
第二节 典型例题分析与计算	88
第三节 思考题与习题参考解答	95
第五章 振幅调制电路	103
第一节 重点与难点	103
一、什么是振幅调制?	103
二、振幅调制信号的分析	103
三、振幅调制电路的功能	105
四、振幅调制电路的分类及要求	106
五、振幅调制电路的基本组成原理	106
六、低电平调幅电路	106
七、高电平调幅电路	113
八、各种调幅电路产生调幅波类型的区分	118
第二节 典型例题分析与计算	118
第三节 思考题与习题参考解答	124
第六章 调幅信号的解调电路	135
第一节 重点与难点	135
一、振幅检波电路的功能、组成与分类	135
二、二极管大信号包络检波电路	136
三、二极管小信号检波电路	142
四、同步检波器	143
第二节 典型例题分析与计算	145
第三节 思考题与习题参考解答	152
第七章 角度调制电路	159
第一节 重点与难点	159
一、角度调制电路的分类与功能	159
二、调角波的基本性质	159
三、调频方法的分类	163
四、变容二极管直接调频电路	164
五、晶体振荡器直接调频电路	166
六、调相电路	167
第二节 典型例题分析与计算	170
第三节 思考题与习题参考解答	175
第八章 调角信号的解调电路	186
第一节 重点与难点	186
一、调角信号的解调电路的功能与技术指标	186
二、乘积型鉴相电路	187
三、门电路鉴相电路	190

四、相位鉴频器	191
五、比例鉴频器	195
六、相移乘法鉴频器	197
第二节 典型例题分析与计算	198
第三节 思考题与习题参考解答	205
第九章 变频电路	214
第一节 重点与难点	214
一、变频电路的功能	214
二、变频电路的组成	214
三、晶体三极管混频器	215
四、双栅场效应管混频器	217
五、二极管平衡混频器	218
六、模拟乘法器混频器	219
七、混频器的干扰	220
第二节 典型例题分析与计算	222
第三节 思考题与习题参考解答	229
参考文献	236

第一章 绪 论

第一节 重点与难点

一、高频电子线路课的研究对象

高频电子线路课是电子信息、通信等电子类专业的一门技术基础课。它主要是研究通信系统中的发送设备和接收设备的各种高频功能电路的功能、原理和基本组成。本课程讨论的工作频率范围是几百千赫至几百兆赫。发送设备和接收设备是通信系统的主要组成部分,它们是由各种功能电路组成,其中包含高频功能电路。值得注意的是,在科学技术快速发展,新电路和新器件日新月异,通信集成电路不断更新的形势下,学习本课程时应特别注意对电路功能和基本原理的理解。加上实践环节的训练,培养运用集成电路去设计与开发新的电子系统的能力。

对于高频功能电路,可以用不同的器件和不同的电路形式构成。虽然使用了不同器件或者不同的电路形式,但是每个高频功能电路的功能和输入、输出的频谱关系是不会变的。因而在学习每个高频功能电路时,应该首先掌握电路的功能和输入、输出频谱的关系,然后再分析实现这样功能变换的基本原理与方法。大规模的通信集成电路通常是由多个功能电路组成,掌握了各个功能电路的功能,对了解和应用集成电路去实现大的电子系统是有利的。

图 1-1 是通信系统的基本组成方框图。其中,输入变换器的功能是将需传送的信息变

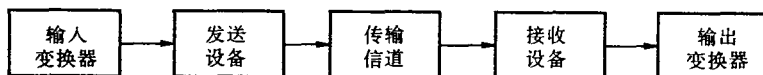


图 1-1 通信系统方框图

换为相应的电信号。当传送信息为非电量(例如,声音、文字、图像等)时,输入变换器是必要的。当传送的信息本身就是电信号(例如,计算机输出的二进制信号、传感器输出的电流或电压信号等)时,在能满足发送设备的要求条件下,可以不用输入变换器,而直接将电信号送给发送设备。传输信道是信号传输的通道,它可以是平行线、同轴电缆和光缆等有线传输方式,也可以是利用自由空间或水等进行无线传输的方式。输出变换器是将接收设备输出的电信号变换成原来的传送信息,如声音、文字、图像等。这三部分内容不是高频电子线路的研究对象。而发送设备和接收设备中的有关高频功能电路才是高频电子线路课的研究对象。

二、无线电发送设备的组成与原理

无线电发送是以自由空间为传输信道,把需要传送的信息(声音、文字或图像)转换成电信号传送到远方的接收点。

信息传输通常应满足两个基本要求,一是希望传送距离远,二是要能够实现多路传输,

且各路信号传输时,应互不干扰。由于需传送的信息变换成电信号,其频率基本上是低频范围内的。这些需传送的电信号,通常称为基带信号。若将基带信号通过电磁波辐射的方式传播,它存在有两个缺点,一是基带信号占有一定的频带宽度,但都在低频范围,相互之间不易区分,很难实现多路通信。二是基带信号频率低,要求要有很长的天线,在工艺及使用中都是很难的。因而,目前通信采用载波调制的方式进行是很普遍的。

所谓调制是用需传送的信息(基带信号)去控制载波振荡信号的三参量之一,使其随需传送的信息成线性关系变化。也就是说调制方式分为振幅调制、相位调制和频率调制三类。能实现这样的调制的电路称为振幅调制电路、相位调制电路和频率调制电路。因为载波信号相当于运载工具,其频率为高频、超高频甚至是微波,其频率很高。若采用无线发射,其天线尺寸可以很小。而对于不同的电台,可以采用不同的载波频率,这样接收时很容易区分,能实现多路传输。

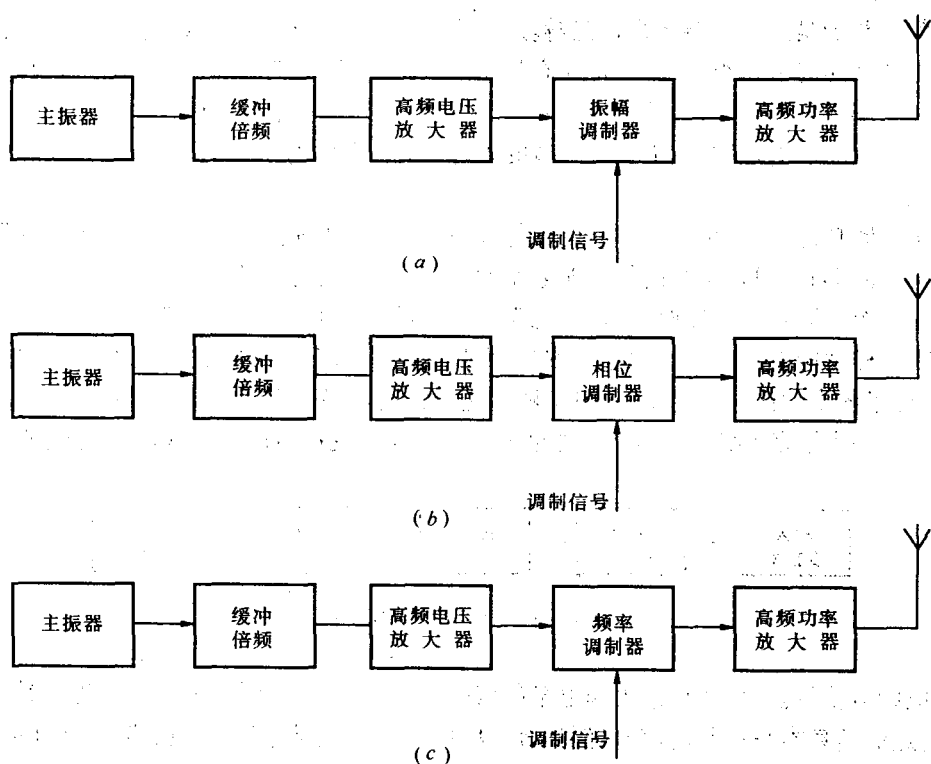


图 1-2 发射机的基本组成方框图

图 1-2 所示是调幅、调相和调频发射机的基本组成方框图。图中只是说明发射机最基本的组成,实际系统将会因不同需要而增加许多其它电路。但是用这个方框图可以看出除调制器分为振幅调制器、相位调制器和频率调制器有所不同外,其余方框电路实现的功能作用基本相同。在本课程的讨论中对主振器(正弦波振荡器)、倍频器、高频电压放大器和高频功率放大器是以高频信号传输来分析,对于三种调制方式,它们具有共性。

下面以图 1-2(a) 为例来说明发射机信息传输的过程。主振器产生的高频振荡信号经缓冲或倍频,并通过高频电压放大后,作为高频载波电压送给振幅调制器。设其表示式为

$$u_i(t) = U_{im} \cos(\omega_c t + \varphi)$$

其中, $u_i(t)$ 是调制器输入高频载波信号的瞬时值, U_{im} 是它的振幅, ω_c 是角频率, φ 为初始相位。

送给调制器的另一信号是需传送的信息经过一定的电路处理达到调制器要求的调制信号, 设其表示式为

$$u_\Omega(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t$$

其中, $u_\Omega(t)$ 为送给调制器的调制信号的瞬时值, $U_{\Omega m}$ 是振幅, Ω 是角频率。

$u_i(t)$ 和 $u_\Omega(t)$ 送给调制器进行振幅调制, 调制器输出的调幅波为

$$u(t) = U_{cm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos(\omega_c t + \varphi)$$

它通过高频电压放大和高频功率放大、传输线经天线以电磁波形式辐射出去。

三、无线电接收设备的组成与原理

无线电接收过程正好和发送的过程相反、它的基本任务是将通过天空传来的电磁波接收下来, 并从中取出需要接收的信息信号。

一般来说, 最简单的接收机应该是由选频回路加解调器组成。接收调幅信号, 解调器为振幅检波器。接收调相信号, 解调器为鉴相器。接收调频信号, 解调器为鉴频器。这样最简单的接收方式, 虽然很少直接采用, 但是解调器仍是任何接收机的核心部件之一。

目前应用非常广泛的接收机是超外差接收机。图 1-3 所示是超外差接收机的主要方框

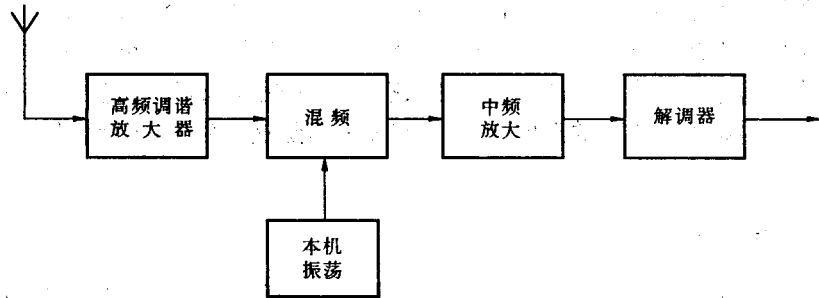


图 1-3 超外差接收机方框图

原理图。超外差接收机的主要特点是, 通过高频调谐放大器对被接收的已调波进行电压放大, 然后送给由混频器和本机振荡器组成的变频器进行变频。所谓变频是将输入已调波的载波频率 ω_c 变换成为频率较低的(或较高的), 且是固定不变的中间频率 ω_i (称为中频), 而其调制规律不变。也就是说, 若输入为调幅波, 通过变频后只是载波频率变为 ω_i , 其振幅变化规律不变。若输入为调相波, 通过变频后只是载波频率变为 ω_i , 而其瞬时相位的变化规律不变。同样, 若输入为调频波, 通过变频后只是载波频率变为 ω_i , 而其瞬时频率的变化规律不变。混频器送出的载波频率为 ω_i 的已调波, 通过中频放大器进行中频信号放大。由于是固定频率的中频放大器, 它不仅可以实现较高的电压放大倍数, 而且选择性也很容易满足, 可以同时兼顾高灵敏度与高选择性的要求。经过中频放大器放大的已调波再通过解调器取出需传送的信息。输入为调幅波时, 解调器是振幅检波器。输入为调相波时, 解调器是鉴相器。输

人为调频波时,解调器是鉴频器。这样就能够取出已调波的原调制信号,实现了接收的过程。当然对于解调出来的原调制信号还会根据不同的需要进行一些必要的信号处理等环节。这些内容已不属于本课程的内容。

第二节 本课程的说明

一、本课程的分析与讨论范围

高频电子线路课程所研究的基本内容应该是发射机和接收机的主要组成部分。对发射机来说,主振器(正弦波振荡器)倍频器、调制器和高频功率放大器是其主要组成功能电路。对接收机来说,高频调谐放大器、混频器、本机振荡器(正弦波振荡器)、中频放大器和解调器(振幅检波器、鉴相器和鉴频器)是其主要组成功能电路。发射机和接收机所需的最基本功能电路在本课程中将给予充分地介绍与讨论。

二、本课程的非线性电子线路分析

本课程讲授的各功能电路,除第二章高频小信号放大器外,其余各章均为非线性电子线路。非线性电子线路的分析方法与线性电子线路的分析方法是不同的。因而在学习本课程的各功能电路时,要根据不同电路的功能和特点,掌握各个功能电路的实现方法和基本原理。要根据输入信号的大小和器件的工作状态不同,选用不同的近似分析法。例如大信号工作条件下的高频功率放大器的分析是采用理想的折线化特性进行折线分析法。频率变换电路通常采用两个输入信号为一大一小的开关工作状态分析法或者采用时变参数分析法等。这些分析法是在特定的条件下进行的近似分析,一定要搞清楚这些条件,才能较好理解非线性电路的分析法。

三、关于功能电路的功能

因为本课程的主要内容是非线性电子电路,所用的非线性器件在电路中的作用是产生新的频率分量。要从根本上掌握电路的原理及实现方法必须掌握功能电路的功能。所谓功能,从频域分析来说,电路的输入频谱和输出频谱的变换关系就是电路应完成的功能。对于接收机和发射机中的有关高频功能电路的功能是系统要求电路所具有的特性。无论使用的是晶体管、场效应管或是集成电路,其电路的频率变换作用是不变的,也就是说电路的输入频谱与输出频谱的变换关系不变。因而,从功能电路的频谱变换关系出发先分析功能电路要求的频谱变换关系,然后根据这些变换关系找出实现这些功能电路的基本原理和实现方法。这样的分析是基本原理分析,对增强学生的能力是有利的。

另外,随着科学技术的飞速发展,集成电路的更新越来越快。要适应集成电路的不断更新,尽快地跟上发展,充分掌握功能电路的功能,就具有跟上集成电路不断更新和合理应用集成电路的能力。因而在学习中一定要充分明白各功能电路的输入、输出频谱的变化关系,找出合理的实现方法,尽可能开发自己的创新能力。

第三节 思考题与习题参考解答

1. 为什么在无线电通信中要使用“载波”发射,其作用是什么?

答:由于需要传送的信息转变成电信号后,其占有的频率成分基本上是低频范围。将这些低频范围的电信号直接发射出去,有两个不可克服的缺点,一是无选择性,相互干扰,不能实现多路通信。二是电信号频率低,无线发射天线尺寸太大。为此采用对载波进行调制的发送方式就能较好地解决这两个缺点,选用高频载频作为运载信息的信号,由于频率高,天线尺寸小。另外,不同的电台采用不同的载频,就很容易实现多路通信。

2. 在无线电通信中为什么要采用“调制”与“解调”,各自的作用是什么?

答:“调制”是发射机的主要功能。所谓调制是将需传送的基带信号加载到载波信号上去,以调幅波、调相波或调频波的形式通过天线辐射出去。

“解调”是接收机的主要功能。所谓解调是将接收到的已调波的原调制信号取出来,例如从调幅波的振幅变化中取出原调制信号。从调相波的瞬时相位变化中取出原调制信号。从调频波的瞬时频率变化中取出原调制信号。

3. 计算机通信中应用的“调制解调”与无线电通信中的“调制解调”有什么异同点?

答:计算机通信中是传送的数字信号,它的调制器的主要作用就是个波形变换器,它将基带数字信号的波形变换成适合于模拟信道传输的波形。解调器的作用就是个波形识别器,它将经过调制器变换过的模拟信号恢复成原来的数字信号。它也与无线通信中的调制一样可分为调幅、调频和调相,只不过无线电通信中传送的基带信号是模拟信号,而计算机中传送的是数字基带信号。

4. 试说明模拟信号和数字信号的特点?它们之间的相互转换应采用什么器件实现?

答:凡信号的某一参量(如连续波的振幅、频率、相位,脉冲波的振幅、宽度、位置等)可以取无限多少数值,且直接与信息对应的称模拟信号。模拟信号的特点是信号连续变化。

凡信号的某一参量只能取有限值,并且常常不直接与信息相对应的,称为数字信号。数字信号的特点是离散(不连续)。

数字信号变模拟信号用 D/A 变换,而模拟信号变数字信号用 A/D 变换。

第二章 高频小信号放大器

第一节 重点与难点

一、高频小信号放大器的功能、分类与技术指标

(一) 高频小信号放大器的功能,是对高频信号实现不失真地放大。需要注意的是所谓小信号是指放大器的输入信号小,用于放大的有源器件(晶体管或场效应管等)是在线性范围内工作,即放大不产生失真。高频是指放大信号的频率在数百千赫至数百兆赫,也就是说在分析放大器时应该考虑有源器件的极间电容对放大器的影响。

高频小信号放大器的功能也可以从输入信号与输出信号所含频谱来说明,即在有源器件工作于线性范围的条件下,输出信号的频谱与输入信号的频谱完全相同。

(二) 高频小信号放大器的分类方式较多,在这里应该特别注意的是按照放大信号的频谱宽窄分为宽频带放大器和窄频带放大器。因为在低频电子线路中讲过的放大器中很少提到窄带放大器,而在通信系统中往往又要用窄带放大器,所以本章内容以分析窄带高频小信号放大器为重点。

(三) 高频小信号放大器的主要技术指标

在分析窄带高频小信号放大器时,应该注意主要技术指标的具体含意。

1. 电压增益与功率增益

放大器的电压增益定义为放大器负载上的输出电压与输入电压之比,即

$$A_{u0} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (2-1)$$

放大器的功率增益定义为放大器输出给负载的功率与输入功率之比,即

$$A_P = \frac{P_o}{P_i} \quad (2-2)$$

2. 通频带

放大器的通频带的定义是放大器的电压增益下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍时,所对应的频带宽度。通常用 $2\Delta f_{0.7}$ 来表示。

放大器的通频带的含意是指输入信号的频率在通频带内的信号为正常放大,而输入信号的频率在通频带外的信号不能正常放大,即电压增益小,可近似认为不能通过放大器。

3. 矩形系数

矩形系数是表征放大器选择性好坏的一个参量。而选择性是表示选取有用信号,抑制无用信号的能力。理想的频带放大器应该对通频带内的频谱分量有同样的放大能力,而对通频带以外的频谱分量要完全抑制,不予放大。所以,理想的频带放大器的频率响应曲线应是矩形。用矩形系数来表示实际放大器的频率响应曲线与理想的矩形频率响应曲线相差的程度,

其定义为

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} \quad (2-3)$$

式中, $2\Delta f_{0.7}$ 为放大器的通频带; $2\Delta f_{0.1}$ 为放大器的电压增益下降至最大值的 0.1 倍时, 所对应的频带宽度。

4. 工作稳定性

放大器工作的稳定性是一个较为重要的问题, 由于晶体管的反向传输导纳不为零, 内部反馈会造成放大器工作不稳。不稳定状态的极端情况是放大器自激, 使放大器完全不能工作。常用稳定系数来表示放大器的稳定性能。

5. 噪声系数

噪声系数是用来表征放大器的噪声性能好坏的一个参量。放大器的噪声系数的定义是放大器输入端信号噪声功率比 P_{si}/P_{ni} 与输出端信号噪声功率比 P_{so}/P_{no} 的比值。用 N_F 来表示

$$N_F = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} = \frac{\text{输入信噪功率比}}{\text{输出信噪功率比}} \quad (2-4)$$

也可用分贝数表示

$$N_F(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} \quad (2-5)$$

它表示信号通过放大器后, 信噪功率比变坏的程度。

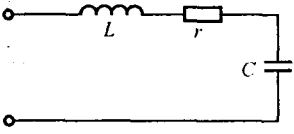
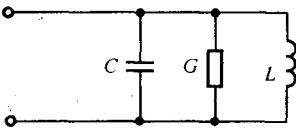
二、分析小信号放大器的基础知识

(一) 串联谐振与并联谐振回路的特性

谐振回路是高频电路中应用很广的无源网络, 特别是并联谐振回路是构成高频放大器、振荡器和频率变换电路的主要部件。一般来说, 在电路中完成频率选择和阻抗变换两个作用。

串并联谐振回路的特性如表 2-1 所示。

表 2-1 串并联谐振回路的特性

	串联回路	并联回路
电路形式		
阻抗或导纳	$Z = r + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$	$Y = G + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})$
谐振频率	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

品质因数 Q		$\frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{\omega_0 C r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}$	$\frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 C R = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{C}{L}}$
谐振电阻		$r = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{L}{C}}$	$R = Q \sqrt{\frac{L}{C}}$
阻抗	$f < f_0$	容 抗	感 抗
	$f > f_0$	感 抗	容 抗

表 2-1 中所列出的 L 和 C 都认为是理想无损耗元件,而在高频电子线路所指的工作频率范围内,电感 L 的损耗是不能忽略的。因而应该将电感的损耗等效到回路中去。具体的等效方法是将电感的损耗用一串联损耗电阻 r_0 或一并联损耗电导 g_0 来等效。通常一个有损电感可在工作频率条件下通过 Q 表,测得电感线圈的电感值和空载品质因数 Q_0 , Q_0 的大小就能反映损耗的大小。图 2-1 表示出一个有损电感等效为一个无损电感和一个串联损耗电阻或一个并联损耗电导的等效关系。图(a)是一个在工作频率下的用 Q_0 表示损耗的有损电感,它可以等效为图(b)所示的串联形式,也可以等效为图(c)所示的并联形式。其等效关系为

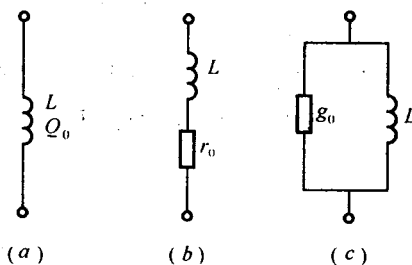


图 2-1 有损电感的等效关系

串联形式:
$$r_0 = \frac{\omega_0 L}{Q_0} \quad (2-6)$$

式中, ω_0 为工作频率,对谐振回路来说应该是谐振频率。

并联形式:
$$g_0 = \frac{1}{\omega_0 L Q_0} \quad (2-7)$$

式中, ω_0 为工作频率,对谐振回路来说应该是谐振频率。

(二) 串并联阻抗的等效互换

串联电路与并联电路的等效互换在分析电路中经常应用,它是在工作频率相同的条件下,电路两端阻抗相等来等效互换的。图 2-2 所示是等效互换电路。其变换关系为

$$R_2 = (Q^2 + 1)r_1 \quad (2-8)$$

$$X_2 = (1 + 1/Q^2)X_1 \quad (2-9)$$

若电路品质因数较高,可得

$$R_2 \approx Q^2 r_1, \quad X_2 \approx X_1$$

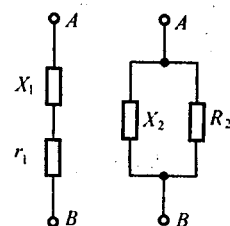


图 2-2 等效互换电路

(三) 并联谐振回路的耦合联接及阻抗变换关系

在窄带放大电路中,并联谐振回路通常是放大器的负载,它的作用是选频和阻抗变换。并联谐振回路耦合联接的方式可分为变压器耦合、自耦变压器耦合和双电容分压耦合。图 2-3 所示是三种耦合的方式。其阻抗变换的关系为

$$R'_L = \frac{1}{p^2} R_L \quad (2-10)$$

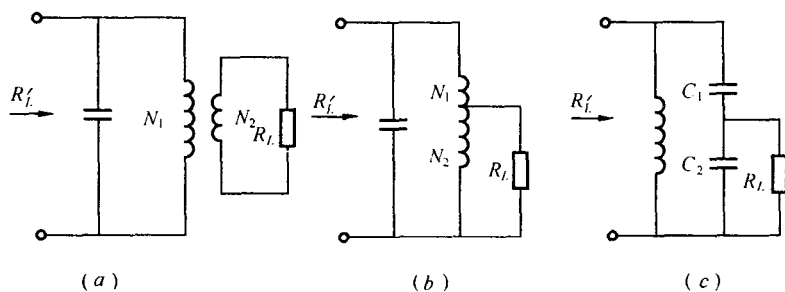


图 2-3 三种耦合联接方式

其中, p 为接入系数, 其定义为

$$p = \frac{\text{转换前的圈数(或容抗)}}{\text{转换后的圈数(或容抗)}}$$

根据接入系数 p 的定义, 也可以得到其它量的变比关系,

$$g'_L = p^2 g_L; \quad C'_L = p^2 C_L; \quad I'_g = p I_g;$$

$$U'_g = \frac{1}{p} U_g \quad (2-11)$$

利用以上关系式可以很方便地进行各种变换, 这对分析电路将是非常有利的。

三、晶体管高频小信号等效电路

(一) y 参数等效电路

y 参数等效电路主要用来分析高频小信号放大器时作为晶体管的等效电路。图 2-4 所

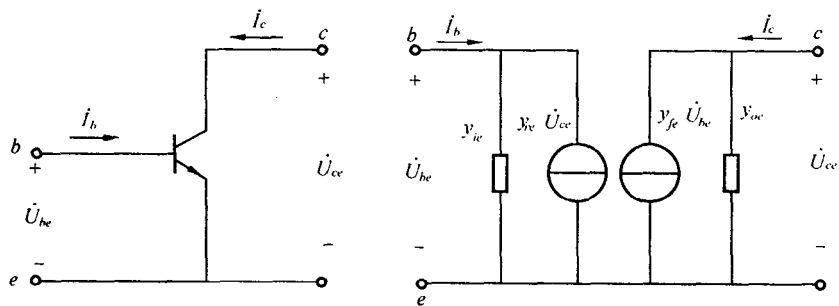


图 2-4 晶体管共射 y 等效电路

示是晶体管共射接法的 y 参数等效电路。根据二端口网络理论, 选定输入电压 $\dot{U}_{be}$ 和输出电压 $\dot{U}_{ce}$ 为自变量, 输入电流 $\dot{I}_b$ 和输出电流 $\dot{I}_c$ 为参变量, 则得到 y 参数的方程组

$$\dot{I}_b = y_{ie} \dot{U}_{be} + y_{re} \dot{U}_{ce} \quad (2-12)$$

$$\dot{I}_c = y_{fe} \dot{U}_{be} + y_{oe} \dot{U}_{ce} \quad (2-13)$$

其中, $y_{ie} = \dot{I}_b / \dot{U}_{be} |_{U_{ce}=0}$ 称为输出短路时的共射组态的输入导纳; $y_{re} = \dot{I}_b / \dot{U}_{ce} |_{U_{be}=0}$ 称为输入短路时的共射组态的反向传输导纳; $y_{fe} = \dot{I}_c / \dot{U}_{be} |_{U_{ce}=0}$ 称为输出短路时的共射组态的正向传输导纳; $y_{oe} = \dot{I}_c / \dot{U}_{ce} |_{U_{be}=0}$ 称为输入短路时的共射组态的输出导纳。

y 参数可以通过测量仪器进行测量,也可通过混合 π 等效电路的参数进行计算。在这里必须注意的是,对于晶体管来说, y_{ie} 是由电导 g_{ie} 和电容 C_{ie} 并联组成,而 y_{oe} 是由电导 g_{oe} 和电容 C_{oe} 并联组成。即

$$y_{ie} = g_{ie} + j\omega C_{ie} \quad (2-14)$$

$$y_{oe} = g_{oe} + j\omega C_{oe} \quad (2-15)$$

这是由于工作于高频时晶体管的极间电容是不能忽略的,因而 y 参数是用复数表示的。

(二) 混合 π 等效电路

混合 π 等效电路是根据晶体管的内部组成工作原理而采用集中参数元件 RC 构成的等效电路,其物理过程明显,在较宽频率范围内均能较好地反映晶体管内部的物理过程。在分析电路原理、说明电路特点等方面用得较多。

(三) 高频参数

晶体管的高频特性可以用截止频率 f_β 、特征频率 f_T 和最高振荡频率 f_{max} 来表征。

1. 截止频率 f_β

定义: $|\beta|$ 下降到低频电流放大系数 β_0 的 $1/\sqrt{2}$ 倍时,所对应的频率称为 β 的截止频率 f_β 。

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})}$$

2. 特征频率 f_T

定义: $|\beta|$ 下降到 1 时,所对应的频率称为 β 的特征频率 f_T 。

当 $\beta_0 \gg 1$ 时, $f_T \approx \beta_0 f_\beta$

3. 最高振荡频率 f_{max}

定义:晶体管的功率增益 $A_P = 1$ 时,所对应的频率称为最高振荡频率 f_{max} 。

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_m}{4r_{bb'}C_{b'e}C_{b'c}}}$$

f_{max} 表示一个晶体管所能适用的最高极限频率。在此频率,晶体管已不可能得到功率放大。

以上三个频率大小的顺序是 f_{max} 最高, f_T 次之, f_β 最低。

4. 任意 f 的 $|\beta|$ 的计算

由 $f_T = \beta_0 f_\beta$ 确定 f_β , 然后用

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}$$

来进行计算。

