

教育部高职高专推荐教材
Jiaoyubu Gaozhi Gaozhuān Tuijian Jiaocai

高频电子线路

胡宴如 主编
胡宴如 章忠全 编

高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



高等学校工程专科教材

高频电子线路

胡宴如 章忠全 编

胡宴如 主编

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路/胡宴如主编. —北京: 高等教育出版社,
1993.11(2001 重印)

ISBN 7-04-004388-2

I. 高… II. 胡… III. 高频-电子线路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 11596 号

高频电子线路

胡宴如 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009

电 话 010-64054588 传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

开 本 850×1168 1/32 版 次 1993 年 11 月第 1 版

印 张 15.5 印 次 2001 年 5 月第 6 次印刷

字 数 400 000 定 价 15.70 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

本书是以国家教育委员会组织制订的《高等学校工程专科电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》为依据,按照高等学校工程专科电子线路教材编审小组1990年12月审定的《高频电子线路》教材编写大纲进行编写的,作为高等学校工程专科电子、通信类等专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

全书除绪论外共七章。主要内容有:高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制与解调电路、混频器、角度调制与解调电路、锁相环路与频率合成技术。每章附有一定数量的习题,书末附有部分习题答案。

根据高等工程专科教育培养目标的要求,本书以应用为目的、以生产第一线正在使用和近期有可能推广使用的技术所需的基础理论为主,突出原理分析为应用服务。减少理论推导,加强基本概念的叙述,同时注重了能力的培养。书中也对某些新技术的应用作了适当的介绍。

前 言

本书是以国家教育委员会组织制订的《高等学校工程专科电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》为依据,按照高等学校工程专科电子线路教材编审小组1990年12月审定的《高频电子线路》教材编写大纲进行编写的,作为高等学校工程专科电子、通信类等专业的教材和相近专业的教学参考书,也可供有关工程技术人员自学和参考。

根据高等工程专科教育培养技术应用型人才的特点,本书强调以应用为目的,以生产第一线正在使用和近期有可能推广使用的技术所需的基础理论为主,突出原理分析为应用服务,减少理论推导,加强基本概念的叙述。为了适应新技术发展的需要,本书对某些新技术的应用也作了适当的介绍。

本书以模拟通信系统为主线来连贯各功能电路,加强了全书的系统性和完整性,这样既便于读者了解和掌握各基本应用电路之间的内在联系以及在整个系统中的作用和地位,同时又使得各基本电路的讨论不是孤立的、分割的。

考虑到集成电路的迅速发展和广泛应用,本书对基本电路分析时充分考虑到集成电路的应用,对应用电路的介绍也以集成电路为主。但是,鉴于分立元件电路目前仍为集成电路技术的基础,同时一些分立元件电路仍然得到应用,所以本书对分立元件电路的分析仍占一定比例。力求把分立元件电路和集成电路结合起来,把集成电路的内容渗透到各章之中,这样既加强了集成电路的概念和应用,又不削弱电路的基础知识。

高频电子线路是一门工程性、实践性很强的课程,学生通过本课程的学习,不但应该掌握必要的基础理论知识,而且还应在分析问题、解决问题和实际动手等能力方面得到锻炼和提高。对于这

些能力的培养,理论教学与实践性教学环节必须密切联系、互相配合,才会取得比较好的效果。本书从以下几个方面来加强这些能力的培养:

(1) 在分析问题的方法上,由常用基本电路入手,讲清基本原理,然后适当综合,再应用到实用电路的分析中去。联系实际应用时,不过多地分析具体细节,而注意引导读者如何确切地进行工程近似来分析实用电路,并进行电路性能的估算,从而掌握选择电路元、器件的基本原则。

(2) 注意与实践课的配合,教材内容上要相互衔接,各有侧重,避免脱节和不必要的重复。基本原理、典型电路、基本应用电路等,主要在理论教材中介绍,而有关电路的测试、调整的原理和方法以及器件的参数等还必须在实践中学习和提高,故这些方面的内容应在实践课教材中叙述。

(3) 增加必要的例题和实用电路的分析。例题着重于问题的分析过程和解题方法的介绍。对电路实例的分析则力求由浅入深,引导读者运用基本概念、基本原理和基本方法来分析较复杂的问题。例题和电路实例可作为习题课和讨论课内容。

(4) 各章都附有一定数量的习题,习题的内容力求突出本课程的特点和基本要求,而且注意到与工程应用相结合。

为满足不同行业、不同专业的需要,本书按理论教学时数 80 学时(《高等学校工程专科电子线路(I)、(II)课程教学基本要求》规定参考学时上限为 72 学时)编写,书中编写了部分加宽加深的內容,可供选讲或自学。选讲內容在编排上加注“*”号,以示区别。

本书由胡宴如主编,第三、四章由章忠全执笔,其他各章均由胡宴如执笔。

江汉大学陆兆熊副教授担任本书的主审,对本书初稿进行了认真细致的审阅,并提出了许多宝贵意见和修改建议;本书在编写过程中得到了高等学校工程专科电子线路教材编审小组的大力支

持和幫助。在此謹致以衷心的感謝。

限于编者水平,加之时间仓促,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1992年2月

目 录

绪论	1
第一章 高频小信号放大器	11
§ 1-1 概述	11
§ 1-2 谐振回路	14
1-2-1 串联谐振回路	14
1-2-2 并联谐振回路	19
1-2-3 信号源及负载对谐振回路的影响	23
1-2-4 耦合谐振回路	35
§ 1-3 小信号谐振放大器	45
1-3-1 晶体管的 Y 参数等效电路	45
1-3-2 单调谐回路谐振放大器	50
1-3-3 多级单调谐回路谐振放大器	60
1-3-4 双调谐回路谐振放大器	64
1-3-5 小信号谐振放大器的稳定性	66
§ 1-4 集中选频放大器	70
1-4-1 集中选择性滤波器	71
1-4-2 集中选频放大器的应用	74
§ 1-5 放大器的噪声	80
1-5-1 噪声的来源及其性质	80
1-5-2 噪声系数、噪声温度	87
1-5-3 晶体管放大器的噪声系数	92
1-5-4 降低噪声系数的措施	94
习题	96
第二章 高频功率放大器	102
§ 2-1 非线性电子线路的基本概念	102
2-1-1 非线性电子线路的作用	102
2-1-2 非线性器件的基本特性	102

2-1-3 非线性电子线路的基本分析方法	106
§ 2-2 谐振功率放大器的工作原理	106
2-2-1 基本工作原理	107
2-2-2 余弦电流脉冲的分解	110
2-2-3 输出功率和效率	113
§ 2-3 谐振功率放大器的特性分析	116
2-3-1 晶体管特性曲线的折线化	116
2-3-2 谐振功率放大器的动态线	118
2-3-3 谐振功率放大器三种工作状态与负载特性	123
2-3-4 各极电压对放大器工作状态的影响	127
§ 2-4 谐振功率放大器的高频特性	130
2-4-1 基区少数载流子渡越时间的影响	130
2-4-2 饱和压降和引线电感的影响	132
§ 2-5 谐振功率放大器电路	133
2-5-1 集电极和基极馈电电路	133
2-5-2 匹配网络	137
2-5-3 谐振功率放大器电路举例	143
§ 2-6 高效率谐振功率放大器	146
§ 2-7 功率合成技术	149
2-7-1 传输线变压器	149
2-7-2 功率合成和分配网络	156
2-7-3 功率合成电路应用举例	162
§ 2-8 倍频器	164
2-8-1 丙类倍频器	165
2-8-2 参量倍频器	166
附录 2-1 余弦脉冲分解系数表	172
习题	175
第三章 正弦波振荡器	180
§ 3-1 反馈振荡器的工作原理	181
3-1-1 反馈振荡器产生振荡的基本原理	181
3-1-2 振荡的平衡条件和起振条件	182
3-1-3 振荡的稳定条件	185
3-1-4 自给偏压对振荡特性的影响	189

§ 3-2 LC 振荡器	191
3-2-1 互感耦合振荡器	192
3-2-2 三点式振荡器	194
3-2-3 场效应管振荡器	202
§ 3-3 振荡器的频率稳定	203
3-3-1 频率准确度和频率稳定度	204
3-3-2 导致振荡频率不稳定的因素	206
3-3-3 提高频率稳定度的主要措施	207
3-3-4 克拉泼和西勒振荡电路	209
§ 3-4 石英晶体振荡器	212
3-4-1 石英谐振器及其特性	212
3-4-2 石英晶体振荡器	216
§ 3-5 其他振荡器	220
3-5-1 负阻振荡器	220
3-5-2 RC 振荡器	225
3-5-3 压控振荡器	230
§ 3-6 特殊振荡现象	232
3-6-1 寄生振荡	232
3-6-2 间歇振荡	233
3-6-3 频率占据现象	234
习题	236
第四章 振幅调制与解调电路	246
§ 4-1 振幅调制的基本原理	246
4-1-1 调幅波的性质	246
4-1-2 抑制载波的双边带调幅信号和单边带调幅信号	251
4-1-3 单边带信号的产生	253
4-1-4 实现振幅调制的基本原理	257
§ 4-2 振幅调制电路	262
4-2-1 二极管调幅电路	263
4-2-2 集成模拟乘法器调幅电路	268
4-2-3 高电平调幅电路	283
§ 4-3 振幅检波电路	288
4-3-1 二极管包络检波电路	288

4-3-2 同步检波电路	299
* §4-4 自动增益控制电路	303
4-4-1 自动增益控制电路的作用	303
4-4-2 增益控制电路	306
习题	310
第五章 混频器	316
§5-1 概述	316
§5-2 三极管混频器	318
5-2-1 三极管混频器工作原理	318
5-2-2 三极管混频器电路	322
5-2-3 差分对混频器	325
5-2-4 集成电路混频器	326
§5-3 二极管混频器	329
5-3-1 二极管平衡混频器	329
5-3-2 二极管环形混频器	331
5-3-3 实际二极管混频器	332
§5-4 混频器的干扰	334
5-4-1 组合频率干扰	335
5-4-2 交叉调制和互相调制干扰	339
* 5-4-3 混频器中其他干扰	340
* §5-5 参量混频器	341
5-5-1 概述	341
5-5-2 门雷-罗威关系式	342
5-5-3 参量混频电路	344
5-5-4 参量放大器	346
习题	348
第六章 角度调制与解调电路	352
§6-1 角度调制的基本概念	352
6-1-1 瞬时频率与瞬时相位概念	352
6-1-2 调角波表示式	353
6-1-3 调角波的频谱和带宽	360
6-1-4 调频制的优缺点	366
§6-2 调频电路	367

6-2-1 概述	367
6-2-2 变容二极管直接调频电路	368
6-2-3 间接调频电路	377
§ 6-3 鉴频器	382
6-3-1 概述	382
6-3-2 斜率鉴频器	384
6-3-3 相位鉴频器	389
6-3-4 比例鉴频器	403
§ 6-4 限幅器	406
6-4-1 二极管限幅器	407
6-4-2 差分对限幅器	408
习题	410
第七章 锁相环路与频率合成技术	416
§ 7-1 概述	416
7-1-1 反馈控制电路基本原理	416
7-1-2 自动频率控制电路	417
§ 7-2 锁相环路	419
7-2-1 锁相环路基本原理	420
7-2-2 锁相环路的数学模型和基本方程	422
* 7-2-3 锁相环路的跟踪特性	429
* 7-2-4 锁相环路的捕捉特性	440
7-2-5 集成锁相环路和锁相环路的应用	445
§ 7-3 频率合成技术	456
7-3-1 频率合成器的主要技术指标	458
7-3-2 直接频率合成法	459
7-3-3 锁相频率合成法	461
7-3-4 集成频率合成器	467
习题	474
参考文献	478
部分习题答案	479

绪 论

一、通信与通信系统

自从无线电技术问世以来,它对人类生活和社会生产带来了非常深刻的影响。随着科学技术的不断发展,无线电技术,或者更广义地说无线电电子学已广泛用于国民经济、军事和日常生活各个领域,技术水平也越来越高。

通信是无线电技术最早应用的方面,通信系统的组成和工作过程,能比较典型地反映无线电技术的基本问题,通信技术的发展和现代化,充分反映了无线电技术的发展。所以,本书将以通信系统为主要研究对象,讨论用于无线电技术设备和系统中的高频放大、振荡、频率变换等电子线路的基本原理及其应用。下面先对通信系统的基本概念加以说明。

通信的一般含义是从发送者到接收者之间消息的传递。用电信号传输消息的系统称通信系统,也称电信系统。

通信系统基本组成方框图如图 0-1 所示。它由输入、输出变换器,发送、接收设备和信道等组成。输入变换器主要担负着将输

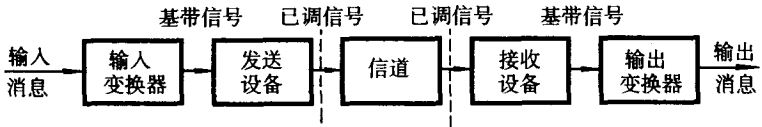


图 0-1 通信系统基本组成框图

入消息变换成电信号的任务,此电信号应反映输入消息的全部信息,常称该信号为基带信号;发送设备用来将基带信号进行某种处理并以足够的功率送入信道,以实现信号有效的传输。这种处理

称为调制,发送设备的输出信号为已调信号。

信道是信号传输的通道,又称传输媒介,不同的信道有不同的传输特性。

接收设备及输出变换器和发送设备及输入变换器的作用相反。由信道传送过来的已调信号由接收设备取出并进行处理,恢复出与发送端相对应的基带信号(这一过程称为解调)。该复原的基带信号经输出变换器即可变成原来形式的消息。

通信系统的种类很多,按通信业务,即按传输的消息种类不同可分为电话、电报、传真和数据通信系统。按传输的基带信号不同可分为模拟和数字通信系统,前者传输幅度随时间连续变化的信号,而后者传输在时间和数值上离散取值的信号。按所用信道的不同可分为有线通信和无线通信系统。利用导线(电线、电缆、波导、光导纤维)来传送信号的称有线通信系统,利用空间电磁波来传送信号的称无线通信系统。

二、调制基本概念

在通信系统中,基带信号一般不适于直接在信道中传输,因此要对它进行某种处理,这个过程称为调制。调制的反过程称为解调。调制和解调分别在发送和接收设备中实现。

用待传输的基带信号去改变高频信号某一参量,就可以实现调制。如用基带信号去改变高频信号的振幅,则称为振幅调制,简称调幅,可用符号 AM 表示。如用基带信号去改变高频信号的频率或相位,则称为频率调制(简称调频,用符号 FM 表示)或相位调制(简称调相,用符号 PM 表示)。经过调制后的高频信号带有基带信号的信息,称为已调信号,而未被调制的高频信号是运载信息的工具,称为载波信号。

在无线电通信系统中,电信号是通过天线以电磁波的形式由空间传输的,只有当电信号的频率很高,以致它的波长与天线的尺寸相近时(例如发射天线的尺寸至少应该是发射信号波长的 $1/10$),电信号才能有效传输。一般基带信号频率很低,例如话音

只有 0.1~6kHz,假如是 1kHz,则其波长为 300km,需用 30km 长的天线,这显然是不能实现的。采用调制就可以把低频基带信号调制在高频信号上,从而易于实现电信号的有效传输。同时不同电台可以采用不同频带的高频电磁波,来避免相互之间的干扰。

下面以简单的振幅调制,来说明调制的基本特点。

设高频载波信号为

$$v_c = V_{cm} \cos \omega_c t \quad (0-1)$$

式中, $\omega_c = 2\pi f_c$, f_c 为载波频率。基带信号为一单频低频信号

$$v_\Omega = V_{\Omega m} \cos \Omega t = V_{\Omega m} \cos 2\pi F t \quad (0-2)$$

用 v_Ω 去改变式(0-1)所示高频信号的振幅,则可得到已调波信号为

$$\begin{aligned} v &= (V_{cm} + k_a V_{\Omega m} \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= V_{cm} (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t \end{aligned} \quad (0-3)$$

式中, $m_a = \frac{k_a V_{\Omega m}}{V_{cm}}$ 称为调幅系数,它说明载波振幅受基带信号控制的程度。 k_a 为调制电路决定的常数。

由式(0-3)可见,已调信号的振幅 $V_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t)$ 与单频低频信号 v_Ω 成线性变化关系,习惯上将已调信号的振幅变化称为包络变化。图 0-2(a)、(b)、(c)分别画出了基带信号、载波信号及已调信号的波形。

将式(0-3)用三角函数关系展开,则得

$$\begin{aligned} v &= V_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m_a V_{cm} \cos(\omega_c + \Omega) t \\ &\quad + \frac{1}{2} m_a V_{cm} \cos(\omega_c - \Omega) t \end{aligned} \quad (0-4)$$

由式(0-4)可知,被单频低频信号调幅后的高频已调信号由振幅为 V_{cm} 、角频率为 ω_c 的载波和两个振幅相同、角频率分别为 $(\omega_c + \Omega)$ 和 $(\omega_c - \Omega)$ 的高频波组成,其频谱图如图 0-3 所示。 $f_c + F$ 和 $f_c - F$ 对称地排列在载频 f_c 的两侧,所以将 $f_c + F$ 称为上边

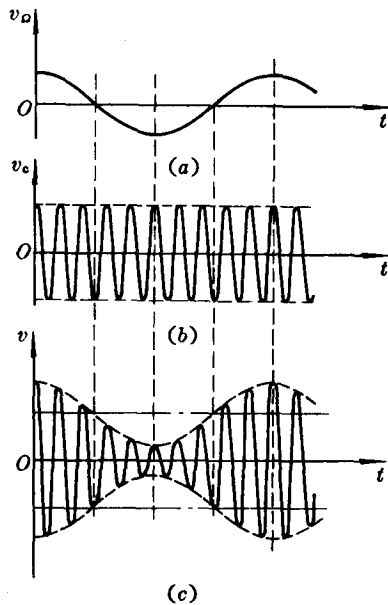


图 0-2 振幅调制波形

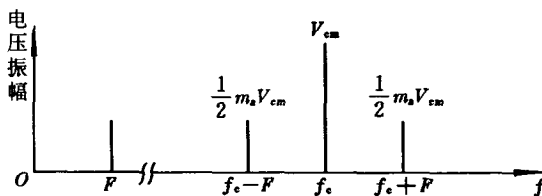


图 0-3 调幅波频谱

频、 $f_c - F$ 称为下边频。可见，振幅调制过程也可以看成是频率搬移过程，即将低频信号 F 搬移到载波频率 f_c 的两边。

上面只讨论了单频调制的情况。对占有一定频带的基带信号的调制，按上述同样方法可得到已调信号表示式为

$$v = V_{cm}[1 + m_a f(t)] \cos \omega_c t \quad (0-5)$$

式中， $f(t)$ 为无量纲的基带信号。因为 $f(t)$ 可以分解为连续谱，

其中每个频谱分量都对载频调幅而产生两个对应的边频分量。所以,已调信号在载频两边出现对应的两个边带,如图 0-4 所示。已调信号在载波频率 f_c 附近占据一定的频带。设基带信号的最高频率为 F_{\max} ,则已调信号的频带宽度为

$$BW = 2F_{\max} \quad (0-6)$$

这就是说,为使发送设备和接收设备不失真地传输该已调信号,其高频电子线路的频带宽度应大于 $2F_{\max}$ 。

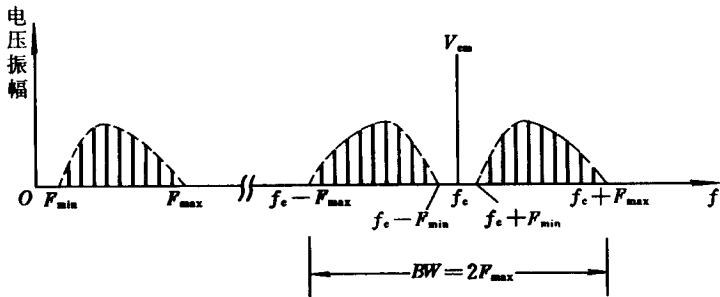


图 0-4 多频调幅的已调信号的频谱分布

对于其他各种调制,已调信号同样也要占据一定的频带宽度,这是关于信号和调制的一个基本概念。

三、模拟通信发送和接收设备

发送和接收设备是通信系统中的核心部分,不同的通信系统,其发送和接收设备的组成是不完全相同的,但基本结构还是相似的。下面以无线模拟通信系统为例来说明通信发送和接收设备的基本组成。

图 0-5 所示为一种无线电调幅发送设备的组成方框图,图中还画出了各部分输出电压的波形。

振荡器用来产生最初的高频信号,经过倍频器后即成为载波频率信号。倍频器可将最初的高频信号频率整数倍升高到所需值。在倍频器后通常还可设置高频功率放大器,用来放大载波信