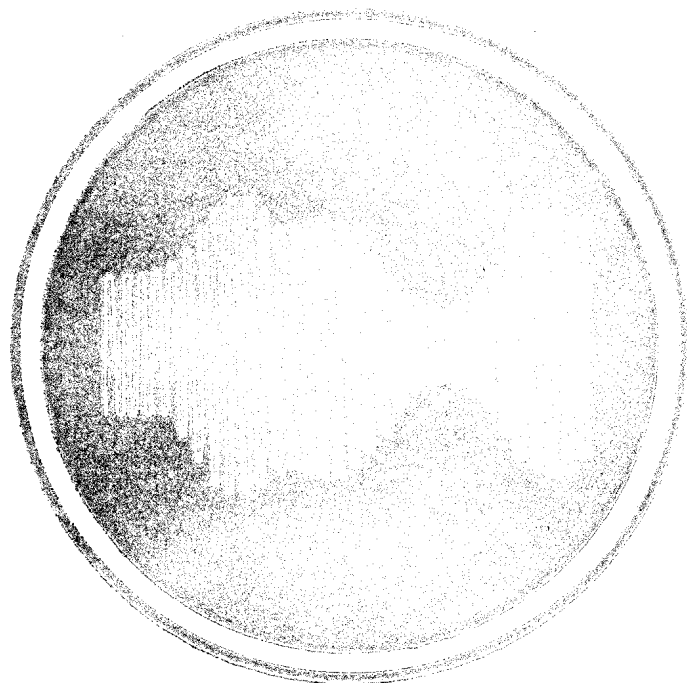


GAO PIN DIAN LU YUAN LI
YU FEN XI



杜武林 主编

高频电路

原理与分析

2.1

内 容 简 介

本书主要研究无线电设备中的高频电路。内容包括：高频功率放大器、正弦波振荡器、电子噪声和高频小信号放大器、振幅调制与解调、混频、频率调制与解调、锁相环原理及其应用。每章后附有思考题与习题，书末附有部分习题答案。

本书总结了作者长期从事高频电子线路课程教学的经验，也考虑了电子科学技术的发展和教学改革的要求。本书在精选内容、控制教材篇幅、反映集成电路在高频电路中的应用及适当结合整机概念等方面有一定特色。

本书可供高等院校通信及无线电技术专业课作“高频电子线路”、“通信电子线路”等课程的教材，舍去某些章节后也可以作为夜大、职大、电大等大专教材，还可供有一定基础知识从事实际工作的工程技术人员自学参考。

高等学校教材

高频电路原理与分析

杜武林 魏 桢 张厥盛 编

责任编辑 叶德福

西北电讯工程学院出版社出版发行

西北电讯工程学院印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 532 千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数 1—3,500

统一书号：15322·69

定价 3.70 元

前 言

本书是西北电讯工程学院信息工程系通信专业的“高频电子线路”课程的教材。在确定教材的内容和深度时，也考虑了无线电技术专业类的需要，因此本书也可作为有关专业的“高频电子线路”、“通信电子线路”、“非线性电路”等课程的教材。在舍去某些章节后，本书也可作为无线电技术专业的大专班、夜大学的教材。

本书主要研究各种无线电设备和系统中高频电路的原理、线路和分析方法。随着教学改革的发展和科学技术的迅速发展，“高频电子线路”课程的地位和作用也在不断变化，要求内容不断更新。为此，在编写本教材时，力求达到控制教材篇幅、精选内容、突出重点、便于教学的目的。

在精选内容方面，根据1976年我们编写《无线电通信设备》教材的经验和长期教学实践的体会，本书以典型高频电路为主，着重阐述它们的基本工作原理和基本分析方法，达到掌握和巩固基本概念和提高自行研究分析类似电路的能力。对于一些不常用的电路、纯理论性的推导过程，以及一些具体设计步骤之类的内容作了较多的删减。为了在一个学期内以80学时实施完本课程，本书根据高频电路的内在联系，合并了有关章节，控制了教材的篇幅。根据振幅调制和频率调制两种基本调制方式，将调制和解调合并为两章；考虑到电子噪声和高频小信号放大器的有机联系，也合并为一章。作为本书主要内容的非线性电路分析方法，在振幅调制与解调一章中加以讨论。考虑到在现代无线电设备中，锁相环作为一个多功能部件用得越来越多，已经成为一个基本的高频单元电路，将锁相环原理及其应用单独成一章。由于振荡回路和传输线变压器在高频电路中用得很多，作为补充知识在第二章附录中介绍。在编写过程中，力求反映集成电路在高频电路中的应用，特别是在低电平电路中的应用。在研究各单元电路时，既考虑了以分立元件为主，也适当结合它们在集成电路中的应用。而对于集成模拟相乘器、集成调频解调器和集成锁相环等内容都作了较充分的介绍。对于一些技术较新、有发展前途的非基本电路，如传输线变压器、高效功放、功率合成、集中选频放大器等都作了必要的介绍。在着重讲述单元电路的同时，也尽可能地介绍一些有关整机知识。

“高频电子线路”是一门工程性和实践性很强的课程，教材仅为学好课程提供必要的基础，有许多理论知识和实际技能，如实际线路的组成、测量方法和仪器、实际动手能力等，还必须在实践中学习和提高。为此，在实施本课程时，应配有二十学时左右的实验课。

采用本书作本科班教材时，建议各章的学时数为：绪论2学时（复习有关振荡回路和介绍传输线变压器知识，可在绪论课结束后进行，约需4学时），高频功放10学时，振荡器12学时，噪声和小信号放大8学时，调幅和解调12学时，调频与解调14学时，锁相环10学时。

本书由杜武林、魏矜、张厥盛三人共同编写。第一至四章由杜武林执笔；第五至七章由魏矜执笔；第八章由张厥盛执笔。由杜武林负责全书的组织 and 定稿工作。李纪澄主审了本书。高频教研组的全体同志参加了教材编写计划的讨论和传阅了初稿，并提出了许多宝贵意见。申洪勤、黄书川同志对部分修改稿提出了许多有益意见，在此一并表示谢意。

限于作者水平，本书定会有许多不妥甚至错误之处，恳请本书读者给我们以这方面的反馈信息。

编者

1986年1月

常用符号表

A	耦合因子	Q	品质因数
B	电纳; 信号带宽; 系统带宽	Q_0	无载品质因数
B_n	等效噪声带宽	Q_L	有载品质因数
$B_{0.7}$	3dB 带宽	R, r	电阻
b	电纳; 四端网络和滤波器衰减	S	放大器稳定系数; 理想转移特性斜率; 信号功率
C	电容	S_c	临界线斜率
D	晶体二极管	$S(\omega)$	功率谱密度
E	电源电压; 交流电势振幅	s	复频率
e	电动势	T	周期; 振荡器环路增益; 晶体管符号
F	调制频率; 反馈系数	T_e	噪声温度
$F(s)$	滤波器传递函数	T_r	变压器符号
f	频率	U	直流电压; 电压振幅
G	电导; 增益(dB 表示)	u	电压瞬时值
g	电导	X, x	电抗
g_c	变频跨导	Y, y	导纳
g_m	跨导	Y_f	正向转移导纳
$H(j\omega)$	传输函数复值	Z, z	阻抗
I	直流电流; 电流振幅	α	传输线相移常数; 共基电流放大系数
i	电流瞬时值	α_c	电容温度系数
K	电压放大倍数(放大量); 锁相环环路增益	α_L	电感温度系数
$K(t)$	开关函数	α_f	频率温度系数
K_d	波段系数; 检波效率	β	共发电流放大系数
K_p	功率放大倍数	γ	变容管电容指数
$K_{0.1}$	矩形系数	ζ	阻尼系数
k	波茨曼常数; 耦合系数	η	效率
k_c	临界耦合系数	θ	信号起始相角; 电流脉冲通角
k_F	振荡器反馈系数值	$\dot{\theta}$	瞬时角频率
L	电感	θ_e	瞬时相差
M	互感	λ	波长
m	调幅度(振幅调制度)	ξ	电压利用系数; 广义失谐
m_f	调频指数	ρ	回路特性阻抗
m_p	调相指数	τ	时常数; 时移
N	变压器线圈匝数; 噪声功率	φ	幅角; 信号相位
N_F	噪声系数	ω	角频率
n	变压器线圈匝比	Ω	调制角频率
P	功率		
p	接入系数; 运算符		

目 录

第一章 绪 论

第一节 概述	1
第二节 无线电通信系统的组成	2
第三节 信号、调制和频谱	4
参考文献	7
思考题与习题	8

第二章 高频功率放大器

第一节 概述	9
第二节 高频功率放大器的原理和特性	9
一、工作原理	9
二、高频功率放大器的近似分析	12
三、高频功放的外部特性	18
第三节 高频功放的高频特性	21
一、少数载流子的渡越时间效应	21
二、非线性电抗效应	22
三、发射极引线电感的影响	23
四、饱和压降的影响	23
第四节 高频功率放大器的实际线路	23
一、直流馈电线路	23
二、高频功放的输出线路	24
三、推挽联接线路	29
第五节 高效功放与功率合成	30
一、D类高频功率放大器	30
二、功率合成器	33
第六节 倍频器	35
一、晶体管倍频器	35
二、参量倍频器	36
附录一 并联振荡回路与耦合回路	38
附录二 传输线变压器	49
附录三 余弦脉冲分解系数表	58
参考文献	59
思考题与习题	60

第三章 正弦波振荡器

第一节 反馈振荡器的原理	64
第二节 振荡条件的分析	66
一、振幅平衡条件	67

二、相位平衡条件	68
三、稳定条件	68
第三节 振荡器的线路	69
一、构成振荡器线路的原则	69
二、电容反馈振荡器	70
三、电感反馈振荡器	72
四、两种改进型的电容反馈振荡器	74
五、场效应管振荡器	75
第四节 振荡器的频率稳定	77
一、频率稳定的意义和表征	77
二、振荡器的稳频原理	78
三、振荡器的稳频措施	80
第五节 LC 振荡器的设计考虑	82
一、振荡器电路选择	83
二、晶体管选择	83
三、起始工作点和工作状态的选择	83
四、振荡回路和反馈电路的元件选择	83
第六节 晶体振荡器	84
一、石英晶体及其等效电路	84
二、晶体振荡器电路	87
三、高稳定晶体振荡器 ^[4]	91
第七节 RC 振荡器	93
一、RC 移相振荡器	93
二、文氏桥振荡器	95
第八节 负阻振荡器	96
第九节 振荡器中的几种现象	98
一、间歇振荡	98
二、频率拖曳现象	99
三、振荡器的占据现象	101
四、寄生振荡	103
参考文献	105
思考题与习题	105

第四章 电子噪声与高频小信号放大器

第一节 噪声的来源与特性	109
一、电阻热噪声	109
二、晶体三极管噪声	114
三、场效应管噪声	115
第二节 晶体管放大器中的噪声	115

第三节 噪声系数和噪声温度	116
一、噪声系数的定义	116
二、噪声温度	119
三、噪声系数的计算	119
四、多级放大器的噪声系数	121
第四节 高频小信号放大器概述	123
一、对高频放大器的主要要求	123
二、高频放大器的类型	124
第五节 晶体管谐振放大器	125
一、单回路谐振放大器的原理	125
二、高频放大器的分析	126
三、放大器稳定性讨论	129
四、输出回路的设计	133
第六节 双调谐及参差调谐放大器	135
一、双调谐放大器	135
二、参差调谐放大器	137
第七节 集中选频放大器	139
一、晶体滤波器	140
二、陶瓷滤波器	141
三、机械滤波器	141
四、声表面波滤波器 ^[7]	142
附录 各种组态 Y 参数变换关系	143
参考文献	144
思考题与习题	144

第五章 振幅调制与解调

第一节 振幅调制信号分析	147
一、调幅波的分析	147
二、双边带信号	150
三、单边带信号	151
第二节 调制方法概述	153
一、非线性电路的频率变换作用	153
二、调制方法	155
第三节 二极管调制器	156
一、平衡调制器	156
二、环形调制器	160
第四节 差分对调制器	163
一、差分电路原理	163
二、差分电路的调制原理	166
三、单差分对调制电路	167
四、双差分对调制器	168
五、差分对的线性化	169
第五节 高电平调制电路	171

一、基极调幅	171
二、集电极调幅	172
三、组合调制	173
第六节 单边带信号的产生	173
一、滤波法	173
二、移相法	174
第七节 振幅解调的方法	176
第八节 二极管峰值包络检波器	177
一、原理电路及工作过程	177
二、性能分析	180
三、检波器的失真	183
四、实际电路及元件选择	186
五、其它峰值包络检波器	187
第九节 同步检波	189
一、高频电压的叠加	189
二、同步检波原理	190
三、电路	192
四、插入载频不同步引起的失真	193
参考文献	193
思考题与习题	194

第六章 混频

第一节 概述	198
一、混频器的功用	198
二、混频器的工作原理	198
三、混频器的分类	200
四、混频器的主要性能指标	200
第二节 晶体三极管混频器	201
一、工作原理分析	201
二、变频跨导	203
三、等效电路及变频增益	204
四、混频器工作状态的选择	205
五、实际电路	206
第三节 场效应管混频器	208
一、结型场效应管混频器	208
二、双栅 MOS 场效应管混频器	212
第四节 二极管混频器	214
一、单二极管混频器	215
二、平衡混频器和环形混频器	218
第五节 混频器的干扰	220
一、信号与本振的自身组合干扰	221
二、外来干扰与本振的组合干扰	223
三、交叉调制干扰(交调失真)	225

四、互调干扰(互调失真)	226
五、包络失真和阻塞干扰	228
六、倒易混频	228
第六节 非线性电路小结	229
一、器件非线性特性的近似表示	229
二、非线性电路的分析方法	230
三、频率变换作用	231
参考文献	232
思考题与习题	233

第七章 频率调制与解调

第一节 调频信号分析	237
一、调频信号的参数与波形	238
二、调频波的频谱	239
三、调频波的信号带宽	242
四、调频波的功率	243
五、调频与调相信号间的关系	243
第二节 调频方法	245
一、窄带调频波的产生方法	245
二、一般调频波的产生方法	246
三、对调频振荡器的要求	247
第三节 变容二极管直接调频电路	247
一、变容二极管调频原理	247
二、调频性能分析	249
三、变容管调频器实际电路举例	252
第四节 其它直接调频电路	253
一、晶体振荡器直接调频	253
二、电抗管直接调频	255
三、三角波调频	258
第五节 间接调频	260
一、回路参数移相	260
二、RC 网络移相	261
三、比较法间接调频	262
第六节 调频解调概述	263
一、波形变换原理及方法	263
二、对鉴频器的要求	267
第七节 相位检波器	267
一、正弦鉴相特性	268
二、三角波鉴相特性	269
第八节 相位鉴频器	269
一、基本原理	269
二、互感耦合相位鉴频器	270
三、电容耦合相位鉴频器	276
四、实际电路举例	278

第九节 比例鉴频器	278
一、电路	279
二、工作原理	279
三、限幅作用	280
四、实际电路举例	281
第十节 正交鉴频器	282
一、正交鉴频原理	282
二、IC 正交鉴频器	283
三、与门正交鉴频器	285
第十一节 其它鉴频器介绍	286
一、零交点鉴频器	286
二、晶体鉴频器	287
第十二节 调频接收机集成化及特殊电路	288
一、预加重及去加重电路	289
二、静噪电路	291
三、调频接收机的集成化	291
附录 贝塞尔函数的数值表	296
参考文献	298
思考题与习题	298

第八章 锁相环原理及其应用

第一节 基本原理	305
一、相位关系的描述	305
二、环路组成	305
三、环路模型与动态方程	309
四、一阶环路的捕获、锁定与失锁	311
第二节 跟踪特性	314
一、线性相位模型与传递函数	315
二、对输入暂态信号的时间响应——暂态 误差与稳态误差	317
三、对输入正弦信号的响应	320
四、稳定性问题	323
五、非线性跟踪	324
第三节 捕获特性	325
一、捕获过程	326
二、捕获带与捕获时间	328
三、辅助捕获方法	329
第四节 集成锁相环路及其应用	330
一、集成化环路部件	330
二、单片集成锁相环路	335
三、集成锁相环路的应用	336
参考文献	337
思考题与习题	338
本书部分习题答案	339

第一章 绪 论

第一节 概 述

本书主要讨论用于各种无线电技术设备和系统中的高频电子线路。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、军事和日常生活的各个领域。无线电通信、广播、电视、雷达、导航等就是无线电技术应用的几个主要方面。它们的一个共同特点是都利用高频(射频)无线电波来传递消息。因此，尽管它们在传递消息形式、工作方式及设备体制等方面有很大不同，但设备中产生和接收、检测高频信号的基本电路大都是相同的。本书将主要结合无线电通信这一方式讨论其中的高频电路的线路组成、原理和分析。这有利于明确学习基本电路的目的性，加强有关设备和系统的概念。而对于其它无线电技术，也有典型意义。

这里使用的“高频”术语，广义来说就是适于无线电传播的无线电频率，通常又称为射频。无线电传播所以要用到高频，主要原因有两个：一个是高频适于天线辐射，从而在空中产生无线电波；另一个是高频具有宽阔的频段，能容纳许多互不干扰的频道，也能传播某些宽频带的消息信号。

与信号频率 f 对应的一个参数是波长 λ ，在自由空间，波长与频率的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

其中 c 为自由空间光速 ($c = 3 \times 10^8$ m/s)； λ 单位为 m。根据天线理论，只有当天线的尺寸(对于线天线就是长度，面天线就是面积)大到可以与波长 λ 相比较时，天线才能有效地辐射电磁波。由于天线尺寸的实际限制，无线电频率的下限约为几十千赫至几百千赫，上限频率则可以达到几千兆赫至几万兆赫。

众所周知，任何载有消息的无线电波都占有一定的信号频带。射频频率越高，可利用的总频带(或称波段)就越宽，因此利用高频可以在同一波段中实现许多不同对象间的消息传输。另外，某些频带很宽的原始消息(如雷达信号、电视图像、多路语音)只能在很高的频率上才能传输，比如电视图像信号的频带宽度约为 6 MHz，它只适宜在几十兆赫以上的频率上传输。

决定各种无线电技术使用波段的另一主要因素，是无线电波的传播方式。不同的高频波段通常有最适宜的传播方式，而传播方式不同又决定了传播的距离和传播的性能(如损耗大小、信号的稳定性等)。无线电波传播方式主要有：视线传播、地波传播、电离层传播(天波)、对流层散射传播等。图 1-1 就是这几种传播方式的示意图。

表 1-1 列出了无线电波的波段划分、主要传播方式和用途。表中关于传播方式和用途的划分都是相对而言的。通常将频率高于 300 MHz 的分米波、厘米波、毫米波波段统称为微波。狭义的“高频”范围，通常指低于微波频率的范围。本书内容只限于狭义的高频范围，这是因为在微波波段，无论使用的有源器件和线路结构都与高频波段很不相同。

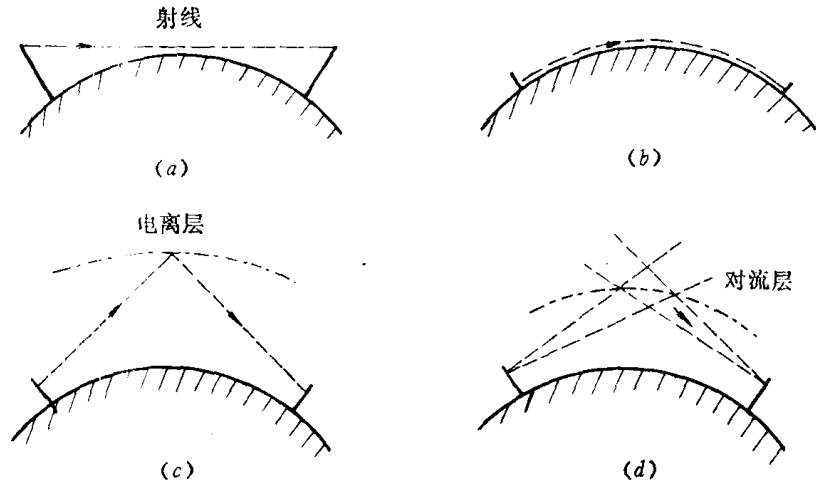


图 1-1 无线电波的几种主要传播方式

(a) 视线传播；(b) 地波传播；(c) 电离层传播；(d) 对流层散射传播

表 1-1 无线电波的波段划分

波段名称	波长范围	频率范围	主要传播方式和用途
长波波段	1000~10,000 m	30~300 kHz	地波；远距离通信
中波波段	100~1000 m	300~3000kHz	地波、天波；广播、通信、导航
短波波段	10~100 m	3~30MHz (高频-HF)	天波、地波；广播、通信
超短波波段	1~10 m	30~300MHz (甚高频-VHF)	视线传播、对流层散射；通信、电视广播、雷达
分米波波段	10~100 cm	300~3000MHz (超高频-UHF)	视线传播、对流层散射；通信、中继通信、卫星通信、雷达、电视广播
厘米波波段	1~10 cm	3000~30,000MHz (极高频-SHF)	视线传播；中继通信、卫星通信、雷达

第二节 无线电通信系统的组成

通信的主要任务就是传输消息。所谓消息是指要传送的语言、文字、图像、数据等，通常它们都是以电信号的形式出现。因此现代通信又称电信。图 1-2 是通信系统的示意图。它由发信设备、收信设备、信道等各部分组成。在无线电通信系统中，信道就是电磁波传播的途径。图中表示的只是一个方向的通信，即发端用户通过发信设备将消息变为适合于信道传送的信号；收信设备则把

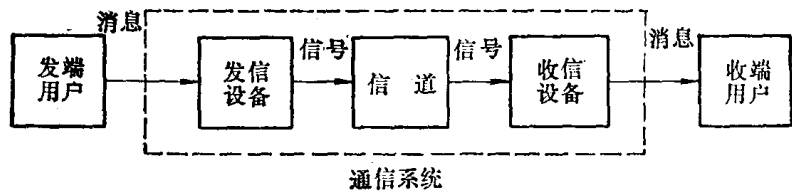


图 1-2 通信系统的组成

收到的信号还原成消息，并传送到收端用户。

无线电通信的类型很多。根据传送的消息不同，可分为无线电话、无线电报、传真、电视、广播等；根据传送信号的形式不同，又可以分为模拟通信和数字通信。各种不同的通信，其设备组成、复杂程度都很不相同。为了说明高频电路在无线电通信设备中的功用和特点，现举一个单路无线电话的收、发信设备的组成方案。这里采用的是最简单的振幅调制方式。图 1-3 是发信设备(发射机)和受信设备(接收机)的组成框图。

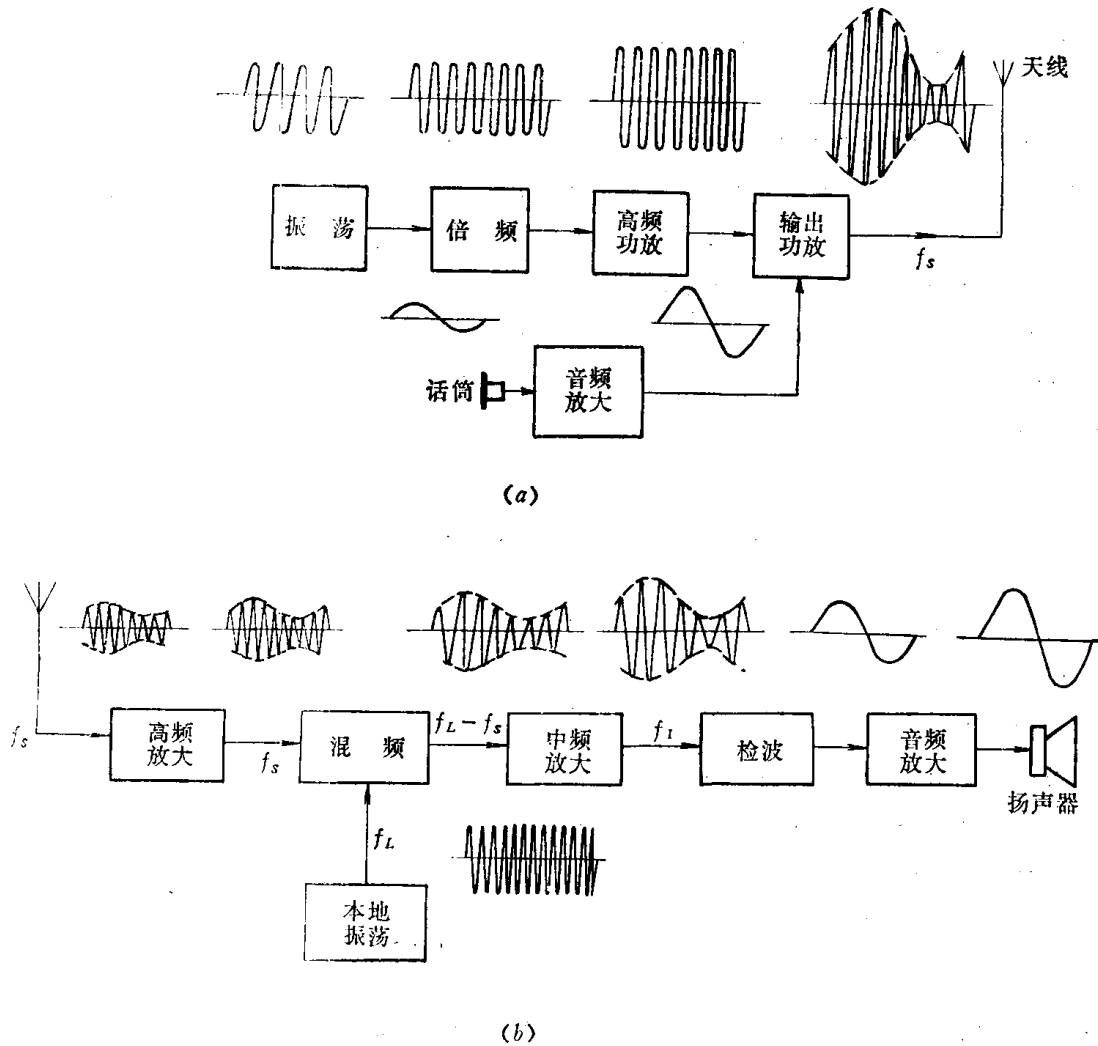


图 1-3 无线电话收发信机的典型框图
(a) 发射机框图；(b) 接收机框图

在发射机中，振荡器的功用是产生最初的高频信号，它的频率等于或低于所需的工作频率 f_s 。在后一种情况下，倍频器输出的信号频率为振荡器频率的整数倍。高频功率放大器的主要功用是将振荡器或倍频器输出的小信号放大到足够的功率电平，用以推动功率更大的高频输出功率放大器。输出功放的一个功用是直接产生大功率的高频信号，并送到发射天线上；另一个功用是对高频信号进行振幅调制，使高频信号的振幅随传送话音信号的大小而变化。图上所需的话音信号是由话筒产生，并经音频放大后得到的（图上用一音频正弦波代表话音信号）。发射机输出功率的大小随用途的不同而不同，一般通信发射机从几百毫瓦至几百瓦以至上千瓦，广播发射机则可以到几千瓦至几十千瓦。

图1-3(b)的接收机是按常用的超外差方式构成的基本线路。接收机输入端的高频放大器的功用是对天线上收到的所需信号进行初步的选择和放大。所谓“选择”就是只选取频率为 f_s 的所需信号，抑制其它频率的无用信号，这通常是靠放大器中的调谐电路实现的。混频器将来自本地振荡器，频率为 f_L 的信号与所需信号相混（频率相减或相加），得到频率 $f_I = f_L \mp f_s$ 的中频信号。中频放大器是中心频率固定的频带（带通）放大器，它可以进一步滤除无用信号。检波器的功能是将得到的调幅信号还原成话音信号（称为解调），经音频放大后供扬声器输出。这种超外差接收机的主要特点是，接收机放大和选择信号的作用主要是由频率固定的中频放大器完成。当信号频率 f_s 改变时，只要相应地改变本地振荡信号的频率 f_L 就可以接收。

可以看出，在发射机和接收机中，除了音频放大器外，主要是处理高频信号的电路。它包括高频信号的产生（振荡器）、放大（小信号放大器、功率放大器）、变换（倍频、混频）、调制和解调等电路。这些单元电路通常都是由有源器件和无源器件构成，既有线性电路，也有非线性电路。这些单元电路以及有关的技术问题，就是本书研究的对象。

应该指出，实际的通信设备通常比上面所列举的典型设备复杂得多，且所用的调制方式也不只是振幅调制这一种。但总的来说，各种通信设备及其它高频设备都是由上述基本高频单元电路和某些其它单元电路组成的。

第三节 信号、调制和频谱

为了进一步了解收、发设备的工作原理，有必要了解这些设备中信号的特点和表示的方法以及调制的基本概念。

我们遇到的信号主要有三种：消息信号、高频载波信号和已调信号。

消息信号就是表现为电信号的消息，话音、电报、图像信号就是常见的消息信号。话音信号与图像信号是随时间连续变化的信号，是一种模拟信号。电报信号（还有其它数据信号）是取离散值的时间信号，是一种数字信号。图1-4就是二进制数字信号的波形，图中电压 E 和零代表着电报消息中的1和0两个数字。

表示一个信号，通常可用三种方法：将它表示为电压、电流的时间函数；直接画出它的波形；频谱分析法。对于较简单的信号（如正弦波、周期性方波等），用前两种方法表示是很方便的。

对于较复杂的信号，比如话音、图像信号，由于它的复杂性和随机性，难以用表示式和波形直接

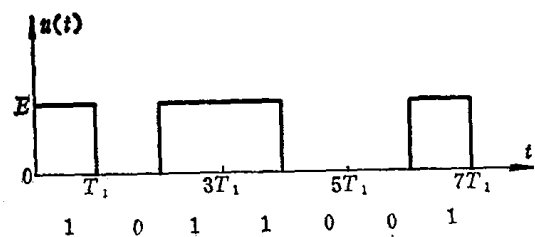


图1-4 二进制电报信号的波形

描述。频谱分析法是基于这样一个事实，一个确定的时间信号 $f(t)$ ，总可以分解为许多不同频率的单一正弦信号。周期性的时间信号可以用富利叶级数分解为许多个离散的频率分量（各分量间成谐波关系）；非周期性的时间信号可以用富氏变换方法分解为连续谱的积分，也可以看作由无穷多个连续频谱的正弦波组成。通过对这些分量的研究就可以了解信号的许多特性，如信号的频率分布、带宽等。在研究某些电子线路时，常常需要了解信号的这些特性。频谱分析法还有一个好处，就是它可以利用仪器对信号（甚至随机信号）进行测量分析。频谱分析仪就是其中最有用的一种仪器。

设周期性时间信号为 $f(t)$ ，当 $f(t)$ 是连续函数或只有有限间断点(周期内)时，它可以展开为富氏级数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) \quad (1-2)$$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\Omega t} \quad (1-3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\Omega t dt & (n=0, 1, 2, \dots) \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\Omega t dt & (n=1, 2, \dots) \\ c_n &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\Omega t} dt & (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \end{aligned} \right\} (1-4)$$

公式(1-3)是周期性信号的指数展开形式， c_n 是复数。这里 n 可取正、负值，表示展开的频率中有“负”频率分量。当然这只是由于分析方便而引入的，这样得到的频谱称为双边谱，而公式(1-2)得到的是单边谱。

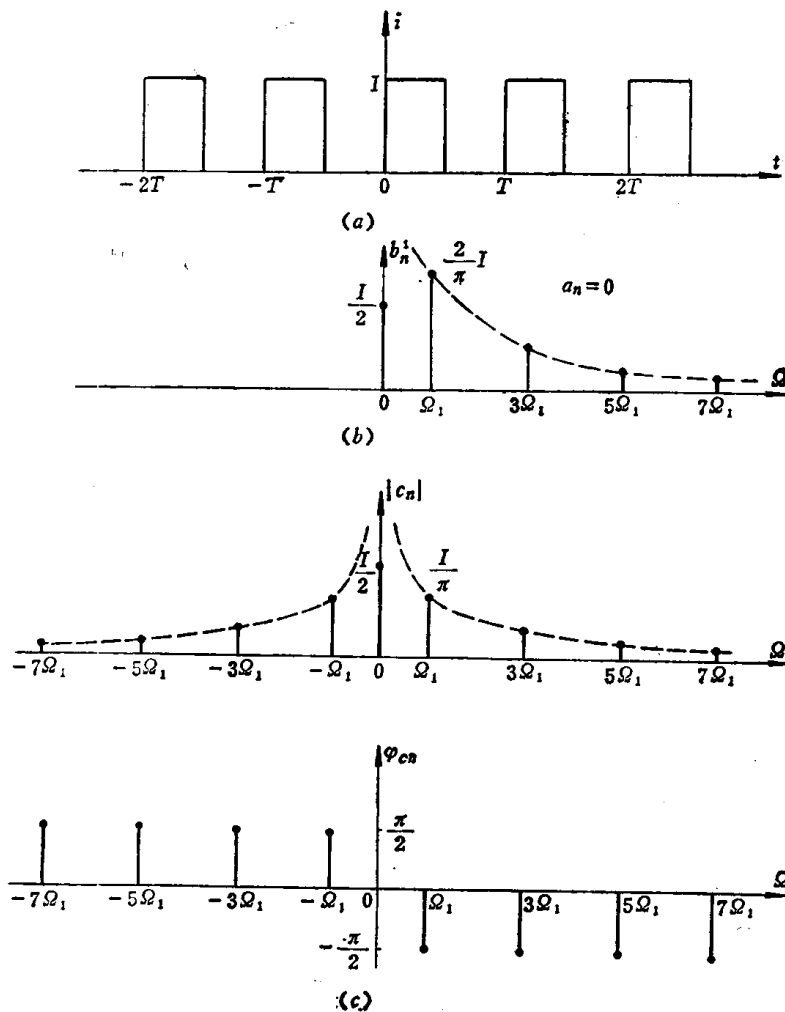


图 1-5 周期性方波信号的波形与频谱
(a) 方波信号波形；(b) 单边谱；(c) 双边谱

图 1-5 是一周期性方波的波形与对应的单边谱和双边谱。它的展开式可表示为

$$i = I \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \Omega_1 t + \frac{2}{3\pi} \sin 3\Omega_1 t + \frac{2}{5\pi} \sin 5\Omega_1 t + \dots \right] \quad (1-5)$$

式中 $\Omega_1 = 2\pi/T$ 。

对于非周期性时间信号 $f(t)$ ，它的富氏变换为 $F(\Omega)$ ，是 Ω 的连续函数，量纲为 A/Hz 或 V/Hz

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\Omega t} dt \quad (1-6)$$

信号 $f(t)$ 则可以表示为谱密度 $F(\Omega)$ 的积分和

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\Omega) e^{i\Omega t} d\Omega \quad (1-7)$$

$f(t)$ 是 $F(\Omega)$ 的反变换。公式(1-6)表示的是双边频谱。非周期信号可以看作是周期 T 为无穷大的信号。由公式(1-4)可知，当 T 趋于无穷大时，频率分量 c_n 趋于零。同时分量由离散变为连续。引用极限的概念，这些分量可以用连续分布的谱密度表示。由信号分析课程可知，如果引入冲击函数 $\delta(\Omega)$ 的概念，即使周期性时间信号，也可以用谱密度表示，从而可以将两者统一起来。但是为了方便，在以后的各章中，我们仍将用频谱分量和频谱密度分别描述周期信号和非周期信号的频域特性。

话音信号是非周期的时间信号，它的频率大致从 0.1 到 6 kHz，其主要能量集中在 0.3~3.4 kHz 范围，通常只需传送此频率范围的信号，就能保证通话所需的懂度及自然度。图 1-6 是话音信号的频谱分布示意图。由于话音信号包含的频率成分是连续变化的，谱线画成一片，频带宽度约为 $3400 - 300 = 3100$ Hz。

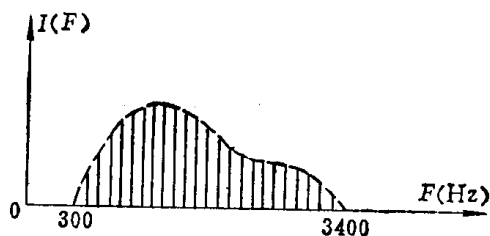


图 1-6 话音信号的频谱分布图

高频载波信号是指尚未受消息调制的单一频率正弦波信号，它可以表示为

$$u = U \cos(\omega_c t + \varphi) \quad (1-8)$$

其中 U 为正弦波信号振幅； $\omega_c = 2\pi f_c$ 为载波角频率， f_c 为载波频率； φ 为起始相位。

要通过载波传送消息，就必须使载波信号的某一参数(振幅、频率、相位)随消息信号改变，这一过程称为调制。

从原理上看，通过分别控制振幅、频率、相位可以实现三种基本调制：振幅调制(调幅)、频率调制(调频)、相位调制(调相)，并分别用 AM、FM、PM 表示。当用电报信号或数字信号调制时，通常又称键控，此时载波的振幅、频率、相位在有限的几个值之间变化(移动)。故数字信号的调制又分别称为振幅键控(ASK)、频率键控(FSK)、相位键控(PSK)。除了这些基本调制外，还可以实现某些组合调制。在微波通信中还用到以脉冲信号为中间信号的二重调制，即消息信号对脉冲进行调制(或对脉冲信号编码)，然后用此脉冲信号对载波进行调制。本书的第五、六章将讨论高频范围常用的几种调制。

振幅调制是最简单而又最早采用的一种调制，广播就是它的最广泛应用的例子。现在先看单一音频信号的振幅调制。设音频信号为 $u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t$ ，则振幅受调制的已调信号为

$$u(t) = U_c (1 + m \cos \Omega t) \cos(\omega_c t + \varphi) \quad (1-9)$$

其中 m 与 U_Ω 成正比，即 $m = kU_\Omega/U_c$ ， m 称为调幅度。比较公式(1-8)和(1-9)可见，已调信

号的特点就是载波的振幅 $U_c(1 + m \cos \Omega t)$ 与音频信号 u_Ω 成线性变化关系。图1-7(b)、(c)分别为载波信号、已调信号的波形。由图可见，只有 m 小于 1，高频信号的振幅(包络)才有可能无失真地反映传送的音频信号。

下面分析已调信号的频谱特性。用三角函数关系可将公式(1-9)分解为

$$u(t) = U_c \cos(\omega_c t + \varphi) + \frac{1}{2} m U_c \cos[(\omega_c - \Omega)t + \varphi] + \frac{1}{2} m U_c \cos[(\omega_c + \Omega)t + \varphi]$$

式中除了原有的载波分量外，还出现了 $\omega_c - \Omega$ 和 $\omega_c + \Omega$ 两个频率分量。它们的振幅 $mU_c/2$ 都与 U_Ω 成正比。这两个分量分别称为下边频($\omega_c - \Omega$)和上边频($\omega_c + \Omega$)。图1-7(d)表示调制信号和已调信号的频谱分布。由图可见，振幅调制过程也可以看成是频率搬移过程，即将音频信号搬移到载波频率的两边。

话音调制的已调信号可表示为

$$u(t) = U_c [1 + mf(t)] \cos(\omega_c t + \varphi)$$

式中 $f(t)$ 为无量纲的话音信号。因 $f(t)$ 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。故已调信号在载频两边出现对应的两个边带，如图1-8所示。已调信号在载波频率 ω_c 附近占据一定的频带。设话音信号的最高频率为 F_{\max} ，则已调信号的频带宽度为

$$B_s = 2F_{\max} \quad (1-10)$$

设传输的话音最高频率为 3400 Hz，则已调信号的带宽为 6800 Hz。为使接收机正确地接收此信号，其高频电路的频带宽度应大于此信号的频带宽度。

对于其它各种调制，已调信号同样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。

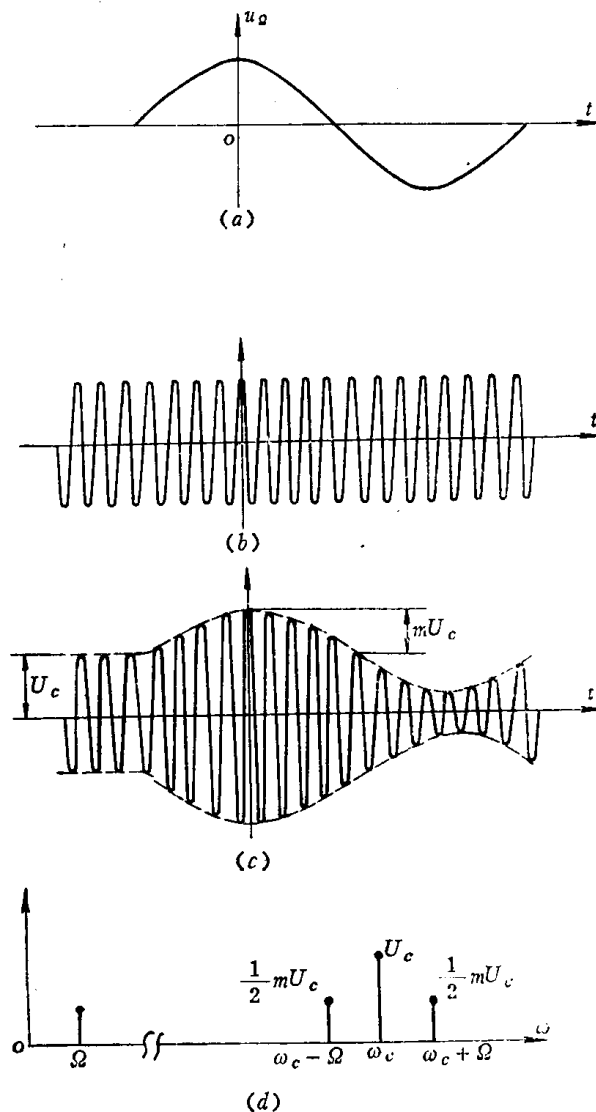


图1-7 振幅调制的波形与频谱
(a) 音频信号；(b) 载波信号；(c) 已调信号；
(d) 调制信号与已调信号的频谱

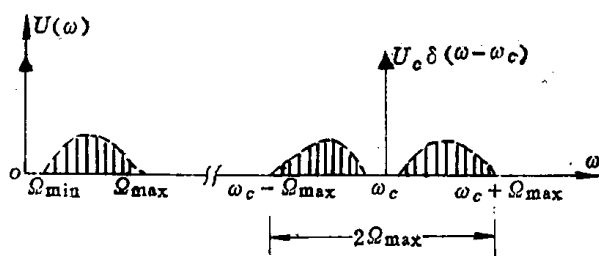


图1-8 话音调制信号和已调信号的频谱分布

参 考 文 献

- [1] 清华大学通信教研组：《高频电路》上册，人民邮电出版社，1979。
- [2] 无线电通信设备编写组：《无线电通信设备——发射部分》上册，西北电讯工程学院，1976。

思考题与习题

- 1-1 无线电通信为什么要用高频信号?
- 1-2 无线电通信为什么要进行调制? 常用的模拟调制有哪些方式?
- 1-3 常用收、发设备中通常有哪些高频电路, 它们的主要功用是什么?
- 1-4 公式(1-9)所表示的单音调制已调信号加在一电阻 R 上, 试分别计算载波 (ω_c) 功率、边频 ($\omega_c \pm \Omega$) 功率及总功率, 并在频率坐标上表示其相对大小。

第二章 高频功率放大器

第一节 概 述

高频功率放大器的主要功用是放大高频信号，并且以得到大的输出功率为目的。它主要应用于各种无线电发射机中。从振荡器产生的信号经过多级高频功率放大器，放大到足够的功率，再送到天线辐射出去。

在发射机的各级高频放大器中，其功率电平是逐级增加的，因此高频功率放大器就其输出功率来说，小的从几十毫瓦到几百毫瓦，而在发射机中，要求输出级的功率可以大到几十瓦、几百瓦以至几十千瓦。目前功率为几百瓦以上的高频功率放大器，其有源器件大多为电子管，几百瓦以下的高频功率放大器则主要采用双极晶体管和大功率场效应管。放大器的输出功率大小不同，意味着它的输入信号的大小相差也很大。以常用的双极晶体管为例，当输入信号较小时，在整个信号周期中晶体管都工作于它的放大区，这种状态称为 *A* 类高频功率放大（也称为甲类放大）。从原理上说，它与低频 *A* 类放大器以及以后要讨论的高频小信号放大器没有很大差别。当输入信号很大时，为了提高放大器集电极效率和输出功率，晶体管要工作到截止区（即发射结、集电结都处于反向偏置状态）。这种状态称为 *B* 类（或乙类）放大或 *C* 类（丙类）放大状态。高频中的 *B* 类放大与低频中的 *B* 类放大相似，它们的集电极电流都只在半个周期中导通。所谓 *C* 类放大，就是集电极电流导通时间小于半个高频周期的放大状态。本章将讨论具有典型意义的 *B* 类和 *C* 类高频功率放大器。

由此可见，高频功率放大器的一个主要特点是工作于大信号的非线性状态。对于有源器件晶体管（电子管、场效应管也一样），要准确分析其在高频非线性工作的情况是十分困难的，而且从工程应用的角度看也无此必要。因此，在下面的讨论中，将在一些近似条件下进行分析，着重定性地说明高频功率放大器的原理和特性。

第二节 高频功率放大器的原理和特性

一、工作原理

图 2-1 是一采用晶体管的高频功率放大器的原理线路。除了电源和偏置电路外，它的主要组成部分是：晶体管、振荡回路和输入激励电路。高频功放中通常采用平面工艺制造的 NPN 高频大功率晶体管，它能承受高电压和大电流，有较高的特征频率 f_T 。我们知道，晶体管的功用是能用一较小信号控制它的集电极电流，从而产生放大作用。在高频功放中我们将更强调它的能量转换作用。在基极信号的控制下，晶体管将集电极电路中供

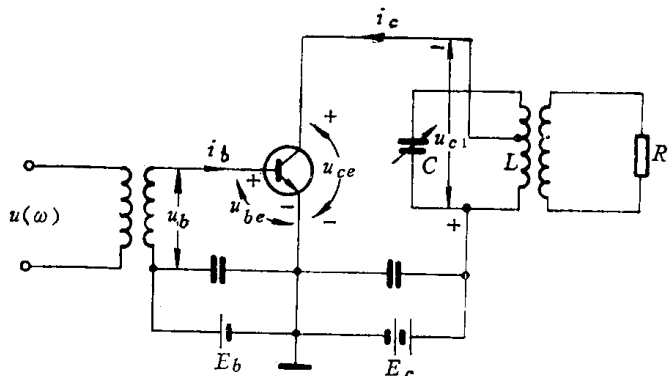


图 2-1 高频功率放大器的原理线路

给的直流能量，转换为高频(交流)能量。振荡回路的基本功用是作为放大器的负载，用以接受、储存和传送高频能量，这种作用可以称为阻抗匹配作用。高频功放之所以用振荡回路作负载，是因为它通常放大的是单一频率信号或者是窄带信号。当放大器工作在B类或C类状态时，集电极电流为一系列高频脉冲，其中除了有有用信号频率的电流分量外，还有大量的谐波分量。采用调谐于信号频率的振荡回路作负载，就可以将这些谐波分量滤除，输出信号频率的电压和功率，这一功用称为滤波作用。激励信号是前级供给的，在高频功放中它的电压较大(可能达1~2V，甚至更大)。在B类、C类工作时，电压 E_b 使晶体管偏置在小电流或截止区，发射结在正向和反向两种偏置状态之间变化，所以基极电流也是高频脉冲。只有信号源的内阻很小，才能维持输入电压 u_b 为正弦电压波形(设信号源为理想正弦波)。下面着重分析在单一正弦波激励下的工作情况。

1. 电流、电压波形 要了解高频功放的原理，首先须了解晶体管的电流、电压波形及其对应关系。基极电压是外加的，它可表示为

$$u_{be} = E_b + U_b \cos \omega t \quad (2-1)$$

在C类工作时， E_b 通常为零值或负值(也有可能为小的正压)。在这种偏置条件下，集电极电流为脉冲电流，其最大值 i_{cmax} 与 u_{be} 的最大值对应。由图2-2，其电流流通的电角为 2θ ，它小于 π 。通常将 θ 称为流通角。这样的周期性脉冲可以分解为直流、基波(信号频率分量)和各次谐波分量，即

$$\begin{aligned} I_c &= I_{c0} + i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} + \dots \\ &= I_{c0} + I_{c1} \cos \omega t + I_{c2} \cos 2\omega t + I_{c3} \cos 3\omega t + \dots \end{aligned} \quad (2-2)$$

式中 I_{c0} 为直流电流； I_{c1} 、 I_{c2} 、 I_{c3} 分别为基波、二次谐波、三次谐波的电流振幅。

参看图2-1，当 i_c 流过回路时，在回路的两端要产生电压。由振荡回路的阻抗特性可知，

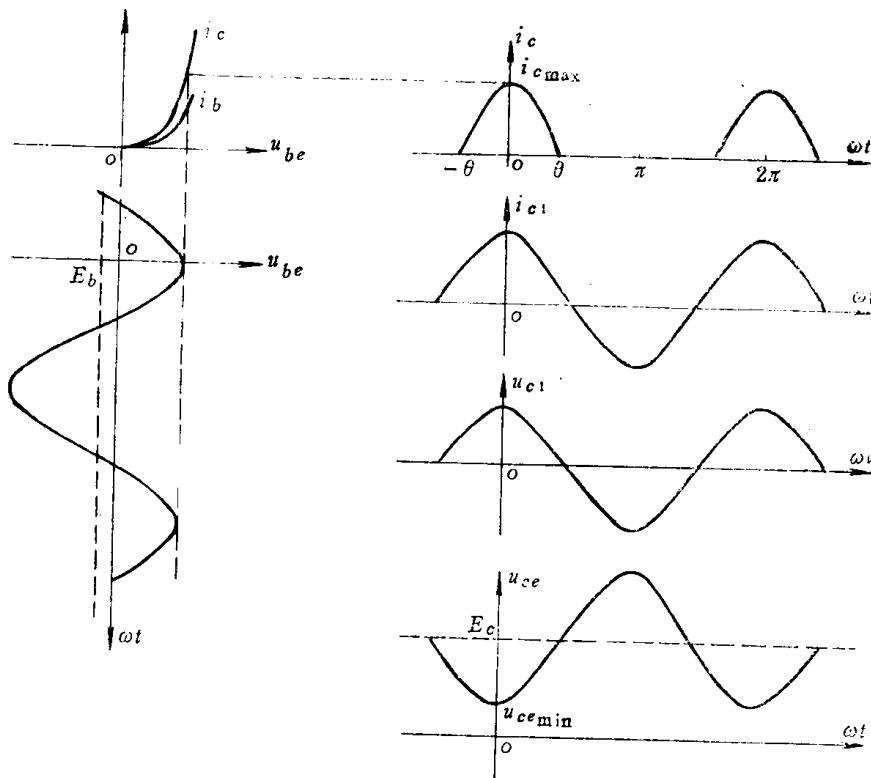


图 2-2 C类高频功放的电流、电压波形