

高等学校试用教材

# 高频电子线路

上册

(第一分册)

华中工学院无线电技术教研室编

张肃文 主编

人民教育出版社

本书系根据1977年11月在合肥召开的全国高等学校工科基础课电工、无线电类教材编写会议所通过的编写大纲编写的,并经1978年12月在武汉召开的审稿会议审查通过,作为高等学校无线电技术专业专业的试用教材,也可供从事无线电技术工作的科技人员参考。

本书较详细地介绍了高频电子线路的基本原理和分析方法,引入了一些比较新的内容,注意理论联系实际,各章附有思考题与习题。

全书共十四章,分上、下两册出版。

上册六章,暂分为第一分册与第二分册。第一分册包括绪论、回路与器件的高频特性、高频小信号放大器、非线性电路的分析方法,共四章。第二分册包括高频功率放大器、正弦波振荡器两章。

下册内容有振幅调制、振幅解调、变频、干扰与噪声、角度调制、调频信号的解调、脉冲与数字调制、频率合成与锁相技术。

本书由华中工学院无线电技术教研室张肃文、王筠、陆兆熊、姚天任分工执笔,张肃文为主编。

本书责任编辑:谭骏云

高等学校试用教材  
**高频电子线路**

上册  
(第一分册)

华中工学院无线电技术教研室编

张肃文 主编

\*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/32 印张 8 字数 193,000

印数 11,501—22,000

1979年6月第1版 1980年4月第2次印刷

书号 15012·0173 定价 0.67元

# 序 言

本书是根据 1977 年 11 月在合肥召开的高等学校工科基础课电工、无线电类教材编写会议所审定的高频电子线路教材编写大纲编写的, 经 1978 年 12 月在武汉召开的高频电子线路教材审稿会议审查通过。

全书共十四章, 即: 绪论、回路与器件的高频特性、高频小信号放大器、非线性电路的分析方法、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制、振幅解调、变频、干扰与噪声、角度调制、调频信号的解调、脉冲与数字调制、频率合成与锁相技术。

在章节安排上, 有如下的考虑: 第一章绪论简略介绍无线电信号传输的基本原理, 为以后各章之间的有机联系建立初步概念。第二章回路与器件的高频特性, 研究高频电子线路中所常用的回路元件与半导体器件的高频特性, 作为以后各章的基础。接着第三章, 讨论高频小信号放大器。第四章扼要介绍分析非线性电路的各种方法, 为学习高频功率放大器、振荡器、调制、解调、变频等章奠定初步的理论基础。为了便于学习, 将振幅调制与解调、角度调制与解调分成四章(第七、八章与第十一、十二章), 并将变频, 干扰与噪声两章紧接在振幅解调一章之后, 成为第九章与第十章。第十三章脉冲与数字调制介绍各种脉冲与数字调制的基本原理, 可作为学习数字通信部分内容的初步。由于频率合成技术的应用日益广泛, 因此本书最后一章介绍了各种频率合成的方法, 并围绕频率合成所用的锁相环路, 进行初步的分析, 介绍了锁相环路的若干应用。

各章均以晶体管电路为主,适当兼顾场效应管电路与集成电路。

在内容选择上,除注意基本理论外,各章均尽可能引入一些比较新的内容。例如,第二章介绍了 $S$ 参数和不定导纳矩阵;第五章介绍了晶体管和电子管丁类放大器;第六章介绍了用极零图分析振荡电路的方法;第七章介绍了差分对乘积调制器;第九章介绍了分裂式环混和差分对混频器;第十一章介绍了三角波调频、模拟计算机调频等;第十二章介绍了符合门鉴频器;等等。

在各章的内容安排上,与传统的写法比较也作了某些变动。例如,第七章振幅调制,习惯上是先讲高电平调幅,再讲低电平调幅,并以高电平调幅为主;本书则改为先讲低电平调幅,再讲高电平调幅,并以低电平调幅为主。又如干扰与噪声,过去是分散在有关章节中讨论的。我们从过去的教学实践中感到有些问题难以处理,所以现在将它们集中为一章,紧接于变频一章之后。

各章有相对的独立性,例如第十三、十四两章,可根据各校的不同情况予以选用,或完全不用,这并不影响全书的完整性。各章加\*号部分为选读或自学内容。每章之末附有思考题与习题,并列举了有关参考资料。

本书遵照国家标准计量局办公室1977年12月15日印发的《国际单位制及使用方法》,将过去所通用的微微法改为皮法(pF),千兆赫改为吉赫(GHz),毫微亨改为纳亨(nH),姆欧(跨导单位)改为西门子(S)。书中插图符号基本上遵照第四机械工业部1965年颁发的部标准SJ137-65。

本书由张肃文主编,各章执笔分工如下:

第1、5、7、14章由张肃文执笔;

第2、3、8、9、10章由陆兆熊执笔;

第4、11、12、13章由姚天任执笔;

第 6 章由王筠执笔。

高频电子线路是无线电技术类各专业的一门主要技术基础课,它的任务是研究高频电子线路的基本原理与基本分析方法,以单元电路的分析和设计为主。为了加强基础理论,避免重复与脱节,华中工学院无线电技术教研室在 1965 年就曾对本专业的课程设置进行过改革,将原来的发送设备、接收设备与无线电技术基础的非线性部分合并为一门高频电路课,并编了讲义。1971 年以后,又在此基础上全面改写了三次,在我院几届学生及有关工厂技术人员训练班中使用。这次则是根据合肥会议的大纲重新编写的。在编写过程中我们力求做到:努力运用辩证唯物主义观点阐明本学科的规律;内容要精简,删除陈旧繁琐的内容,讲清基本概念、基本原理和基本方法,同时又要尽可能反映本门学科国内外的先进科学技术水平;贯彻理论联系实际的原则,培养学生分析问题和解决问题的能力。但是,限于我们的水平,本书距离上述要求还差得很远。

本书初稿承主审单位浙江大学姚庆栋、梁慧君、刘锐、曹琴华、陈瑶琴等同志审阅,提出了许多宝贵的修改意见。参加武汉审稿会议的北方交通大学、西北电讯工程学院、北京工业学院、成都电讯工程学院、天津大学、南京工学院、大连工学院、北京邮电学院、南京邮电学院、太原工学院、哈尔滨工业大学、北京航空学院、国防科技大学、上海交通大学、大连海运学院、合肥工业大学等十余所兄弟院校的代表提出了许多宝贵的修改意见。华南工学院五系 501 教研组曾对编写大纲提出了书面意见。在修改定稿过程中,承华南工学院冯秉铨教授以及西北电讯工程学院李纪澄、陆心如、杜武林等同志在百忙中审阅了部分章节,提出了不少宝贵意见。对于以上所有的单位和同志,我们谨致衷心的感谢。

在历次编写与修订本书的过程中,我们曾参考了许多兄弟院

校的有关讲义,并得到了710、712、714、761、769等工厂及1017、1919等研究所的热情帮助,在此一并致谢。

本书是在华中工学院各级领导的大力支持下,为写作提供了一切必要的物质条件和时间保证,才能完成的。无线电技术教研室葛果行同志曾参加本书编写大纲(初稿)的拟定,并审阅了书稿的部分章节;罗辉映同志及高频电子线路教学小组的全体同志参加了对书稿的审阅工作;郑玉棠和刘章玉两同志绘制了全书插图。对于以上各同志,我们表示衷心的感谢。

由于我们的思想水平与业务水平不高,加之编写时间紧迫,因此书中谬误与不妥之处在所难免。诚恳希望国内专家与读者提出批评指正,意见请寄武昌华中工学院电子一系或人民教育出版社大学室转交。

编 者

1979年5月

# 目 录

序言	1
第一章 绪论	1
§ 1.1 无线电信号传输原理	1
1.1-1 传输信号的基本方法	2
1.1-2 无线电信号的产生与发射	4
1.1-3 无线电信号的接收	9
§ 1.2 无线电信号的传播	11
第二章 回路与器件的高频性能	16
§ 2.1 概述	16
§ 2.2 电感线圈、电容器和电阻器的特性以及在 高频工作时特点	16
2.2-1 电感线圈	17
2.2-2 电容器	20
2.2-3 电阻器	25
2.2-4 磁芯	26
§ 2.3 回路的复习	27
2.3-1 串并联回路	28
2.3-2 耦合回路	30
2.3-3 回路在高频电路中应用时的特点	35
*2.3-4 分布参数回路	38
§ 2.4 晶体管的高频特性	46
2.4-1 高频小信号等效电路	46
2.4-2 晶体管的高频参数	59
§ 2.5 场效应管的高频特性	64
2.5-1 场效应管的等效电路	65
2.5-2 场效应管的参数	66
*§ 2.6 散射参数( $S$ 参数)	68
2.6-1 散射的概念	68

2.6-2 四端网络的散射参数	70
参考资料	72
思考题与习题	72
<b>第三章 高频小信号放大器</b>	<b>74</b>
§ 3.1 概述	74
§ 3.2 分析小信号放大器的预备知识	79
3.2-1 串并联阻抗的等效互换	79
3.2-2 回路抽头时阻抗的变比(折合)关系	81
3.2-3 插入损耗	83
3.2-4 集成电路器件的基本电路	85
*3.2-5 极-零图方法介绍	92
✓ § 3.3 晶体管谐振放大器	97
✓ 3.3-1 单调谐回路谐振放大器	97
✓ 3.3-2 频率可变的单调谐回路谐振放大器	107
3.3-3 多级单调谐回路谐振放大器	108
3.3-4 双调谐回路谐振放大器	112
3.3-5 多级双调谐回路谐振放大器	120
3.3-6 参差调谐频带放大器	122
✓ 3.3-7 集成电路谐振放大器	131
§ 3.4 谐振放大器的稳定性	136
✓ 3.4-1 稳定性分析	136
3.4-2 单向化	142
3.4-3 共发-共基级联放大器的分析	147
§ 3.5 非谐振回路式高频小信号放大器	153
3.5-1 概述	153
✓ 3.5-2 $LC$ 集中选择性滤波器	155
3.5-3 石英晶体滤波器	156
3.5-4 陶瓷滤波器	171
*3.5-5 机械滤波器	176
3.5-6 阻容宽带放大器	181
§ 3.6 场效应管高频小信号放大器	183
3.6-1 场效应管高频小信号放大器的特点	184
3.6-2 场效应管的具体应用	189



*§ 3.7 参量放大器	194
3.7-1 参量放大器的基本工作原理	195
3.7-2 非线性电抗元件中的一般能量关系	198
3.7-3 参量放大器的特性和运用范围	201
附录 3.1 共发-共基复合管的等效导纳参数的推导	202
参考资料	204
思考题与习题	204
<b>第四章 非线性电路的分析方法</b>	<b>209</b>
§ 4.1 概述	209
§ 4.2 非线性元件的特性	212
4.2-1 非线性元件的工作特性	212
4.2-2 非线性元件的频率变换作用	217
4.2-3 非线性电路不满足叠加原理	220
§ 4.3 非线性电路的幂级数分析法	221
§ 4.4 非线性电路的折线分析法	228
§ 4.5 非线性电路的开关函数分析法	231
§ 4.6 几种主要非线性过程举例	234
参考资料	240
思考题与习题	240

# 第一章 绪 论

## § 1.1 无线电信号传输原理

无线电技术的出现与发展，是建立在电磁学的理论与实践的坚实基础之上的。麦克斯韦(J. Clerk Maxwell)于 1864 年发表了“电磁场的动力理论”著名论文，总结了前人的工作，得出了电磁场方程，从理论上证明了电磁波的存在。他指出，电磁波在自由空间的传播速度，以及折射、反射等特性与光波相同。麦克斯韦的这一发见，为人们在实践中证实电磁波的存在提供了依据，为后来的无线电发明和发展奠定了理论基础。

1887 年赫兹(H. Hertz)以卓越的实验成就，证实了电磁波是客观存在的。他在实验中证明：电磁波在自由空间的传播速度与光速相同，并能产生反射、折射、驻波等与光波性质相同的现象。麦克斯韦理论得到了证实。从此之后，许多国家的科学家都努力研究如何利用电磁波传输信息，即无线电通信。其中著名的有英国的罗吉(O. J. Lodge)、法国的勃兰利(Branly)、俄国的波波夫(A. C. Попов)与意大利的马可尼(Guglielmo Marconi)等。在以上这些人中，以马可尼的贡献最大。他于 1895 年首次在几百米的距离，用电磁波进行通信获得成功，1901 年又首次完成了横渡大西洋的无线电通信。从此，无线电通信进入了实用阶段。

从发明无线电开始，传输信号就成了无线电技术的首要任务。直到今天，虽然无线电电子学技术领域在迅速扩大，但信息的传输与处理仍然是它的主要内容。高频电子线路所涉及的单元电路，都将从传输与处理信息这一基本点出发，来进行研究。因此，我们

有必要先在本书的开头概述无线电信号的传输原理。

### 1.1-1 传输信号的基本方法

信息传输对人类生活的重要性是不言而喻的。最基本的信息传输手段当然是语言与文字。语言与文字的产生和发展，对人类社会的发展起了很大的作用。没有语言，人类就无法进行思维。文字不但能够传输、而且能够储存信息。随着人类社会生产力的发展，迫切地要求在远距离迅速而准确地传送信息。我国古代利用烽火传送边疆警报，这可以说是最古老的光通信。以后又出现了“旗语”，就是用编码的方法来传输信息。此外，诸如信鸽、驿站快马接力等，也都是人们曾采用过的传输信息的方法。进入十九世纪以后，人们发现电能以光速沿导线传播。这为远距离快速通信提供了物质条件。1837年莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报，创造了莫尔斯电码。在这种代码系统中，用点、划、空的适当组合来代表字母和数字。这可以说是“数字通信”的雏型。1876年贝尔(Alexander G. Bell)发明了电话，能够直接将语言信号转变为电能，沿导线传送。电报电话的发明，为迅速准确地传递信息提供了新手段，是通信技术的重大突破。

有线电报的基本原理见图 1.1-1(a)。按下电键时，电流  $i$  即通过电磁铁而吸动水平杆，使它与下方的停止点  $l$  相接触。当电键打开时，电流  $i$  等于零，电磁铁即失去吸力，使水平杆因弹簧拉力回到与上方停止点  $u$  相接触。电流通过时间的长短，由电键下

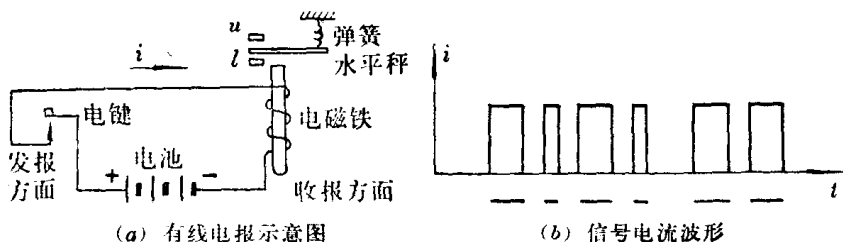


图 1.1-1 有线电报的基本原理

按时间来决定,于是得到如图(b)所示的信号电流波形。收报方面则因水平杆下击时间的长短,听到“滴”(点)“答”(划)的声音。由预先已知的长短组合次序,就能够知道发报方面发来的信号代表什么意思。如果水平杆用墨水笔代替,这笔在被电磁铁吸引时,在一条纸上画线,则这电报符号将是如图(b)下方所示的长短线条:长划是“答”,短划是“滴”。

有线电报是人类利用电能传送信号的最初形式,至今仍是极重要的通信手段,但原理及构造方面已大为改进了。

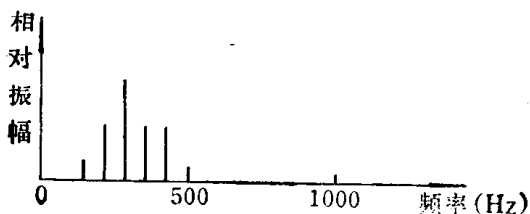
下面简略介绍有线电话的基本原理。

出现了有线电报之后,人们自然会想到,能否利用电能来传送声音信号呢?要做到这一点,首先就要使声能转变为电能的形式,然后才便于传送出去。将声能转变为电能的换能器叫做“传声器”或“话筒”,通常也叫“麦克风”。

一个声音往往包含许多不同的频率。例如图 1.1-2(a)表示风琴发出的低音 C 的周期振荡波形。可以用傅里叶级数将这波形分解为许多不同频率的正弦波分量,得到如图 (b) 所示的频谱分布图。由此可见,声波既然是由许多不同频率的正弦波组成的,那么,



(a) 波形图



(b) 频谱图

图 1.1-2 风琴管所发出的低音 C 波形与频谱图

要想将声能转变为电能，代表这电能的电流(或电压)应该具有原来声音所包含的各种频率，而且各不同频率分量的振幅比例必须与原来声音中各不同频率分量的振幅比例相同。或者说，这音频电流(或电压)的波形必须与原来声音的波形相同(严格地说，还应该加一个条件，即：电与声各频率分量之间的相位关系也必须相同，才能保证波形相同)。话筒就是将声能变为电能的工具。当受声音激动的空气传到话筒后，它就产生音频电流，这音频电流沿导线传送到远方。在远方受话处，利用耳机(或听筒)将音频电能恢复为原来的声音。这就是利用有线电话传送信息。

有线电报与有线电话发明之后不久，人们就发明了无线电。

在赫兹以前，人们认为电能只能沿导线传输。经过麦克斯韦的理论推导和赫兹的实验证明，才知道电能也可以在空间传输。于是，人们自然想到如何实现不用导线来传输信号的问题，从而导致无线电的发明。

一个导体如载有高频电流，就有电磁能向空间辐射。它的情形正像一口钟被锤击后，声能向四方传播一样。电磁能是以波的形式向外传播的，称为电磁波。高频率的电流称为载波电流，这种频率称为载波频率或射频。载有载波电流、使电磁能以电磁波形式向外发射的导体，称为发射天线。如果我们设法使电报或电话信号加到这载波电流上，则电磁波中就含有所要发送的电报或电话信号。这就是无线电信号的发送过程。接收机处收到这电磁波后，首先由接收天线将这电磁波还原为与发送端相似的高频电流。然后经过检波，取出原来的电报或电话信号。利用载有信息(电报或电话)的电磁波，通过发射和接收，这就完成了无线电通信。下面我们略微详细地讨论这一问题。

### 1.1-2 无线电信号的产生与发射

从上面的简略叙述可知，要完成无线电通信，首先必须产生高

频率的载波电流,然后设法将电报或电话信号“加到”这载波上去。在无线电技术中采用振荡器来产生高频电流。振荡器可以看作是将直流电能转变为交流电能的换能器。振荡器是无线电发送设备的基本单元。为了发送电报信号,可以加一个电键来控制供给振荡器的直流电源,即得到如图 1.1-3(a)所示的无线电报发射机方框图。电源接通时,振荡器发出高频电流  $i$ ; 电源断开时,振荡器没有高频电流送出。这样,就得到如图 (b) 所示的高频电流波形,送至发射天线,转变为电磁波发射出去。这电磁波中就包含了所要传送的电报信号。

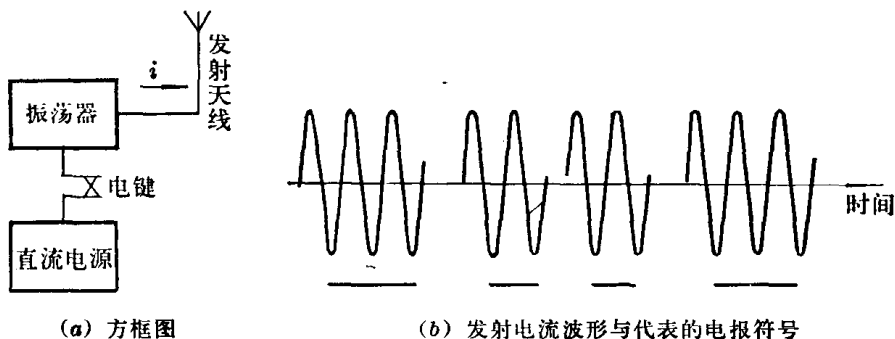


图 1.1-3 无线电报发射机的基本原理图

实际上,为了提高振荡器的频率稳定度和增加输出功率,在振荡器之后往往还要加缓冲级与放大级,将发射功率提高到所需数值,再发射出去。电键一般也不是直接控制振荡器,而是控制振荡器以后的某一级。由于受控电流大,往往超过电键的载流能力,这时可用电键控制一个电流放大器(键控管),由这键控管来控制发射机中某一级电流的通断。这样,就得到如图 1.1-4 所示的方框图。

在发射电话信号时,必须将声音电流加在高频电流上,这步手续称为调制。高频电流好像“交通工具”,载着声音信号向四方辐射。所以高频电流叫做载波。调制的方法大致分为两大类:连续

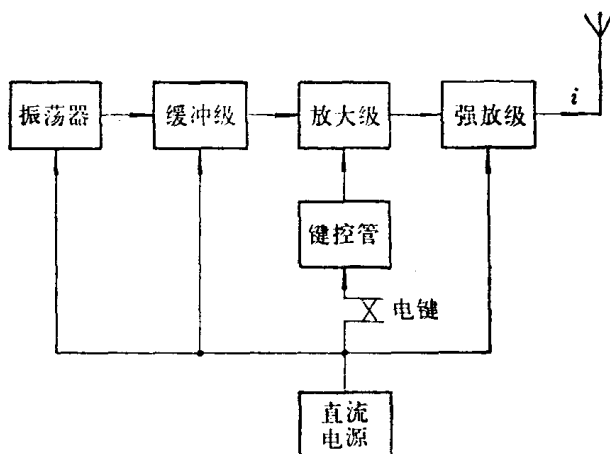


图 1.1-4 振幅键控无线电报发射机方框图

波调制与脉冲波调制。

一个载波电流 (或电压)  $A\sin(\omega t + \varphi)$  有三个参数可以改变, 即: (1) 振幅  $A$ ; (2) 频率  $\frac{\omega}{2\pi}$ ①; (3) 相角  $\varphi$ 。利用声音信号电压 (或其它待传送的信号) 来改变这三个参数中的某一个, 就是连续波调制。由此可知, 连续波调制可以有三种方式: 调幅、调频与调相。现简述如下:

1) 调幅 载波频率与相角不变, 使载波的振幅  $A$  按照信号的变化规律而变化, 例如图 1.1-5(a) 就是正弦调幅的波形图。高频振幅变化所形成的包络波形就是原信号的波形 [同图 (b)]。

2) 调频 载波振幅不变, 使载波的瞬时频率按照信号变化规律而变化。这时瞬时频率的变化即反映了信号的变化。图 1.1-6(a) 表示正弦波调频的波形图, 图 (b) 则表示它的瞬时频率变化的波形。

① 通常  $\omega$  称为角频率,  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  称为频率。为了方便, 在本书中有时对  $\omega$  与  $f$  不再加以区分, 而统称为频率。

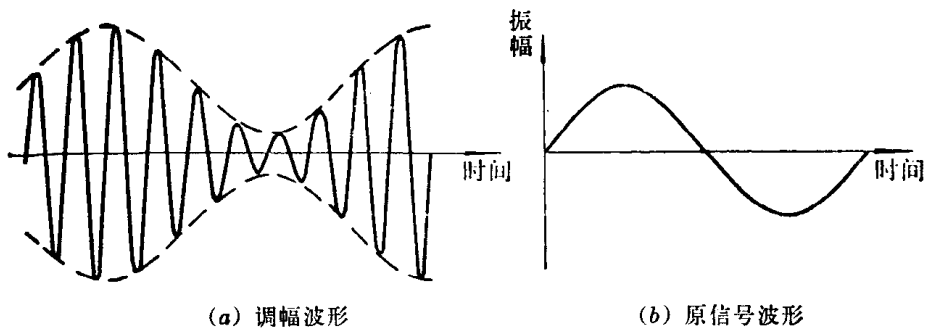


图 1.1-5 正弦调幅波形

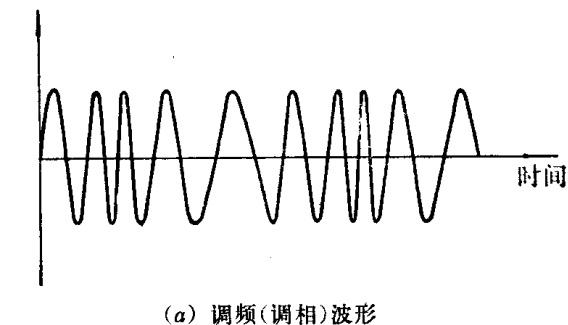


图 1.1-6 正弦调频(调相)波形

3) 调相 载波振幅不变,使载波的瞬时相位按照信号规律而变化。这时瞬时相位的变化即反映了信号的变化。以后(第十一章)我们将知道,瞬时相位的变化总会引起瞬时频率的变化,并且任何相位变化的规律都有与之相对应的频率变化的规律。因此,从瞬时



波形看,很难区分调相与调频。正弦调相波仍然可用图 1.1-6(a)来表示。由于以上的原因,调频和调相有时统称为调角。当然,调频与调相还是有根本的区别的。这在第十一章将详细讨论。

另一大类调制是脉冲调制。这种调制要首先使脉冲本身的参数(脉冲振幅、脉冲宽度与脉冲位置等)按照信号的规律变化,亦即使脉冲本身先包含信号,然后再用这已调脉冲对高频电流进行调制。这就是脉冲调制的过程。由此可见,脉冲调制是双重调制:第一次调制是用信号去调制脉冲;第二次是用这已调脉冲对高频进行调制。这就是所谓二级(二次)调制。

以上简要地介绍了调制的主要形式。最后我们以调幅发射机为例,说明发射机的主要组成部分。

图 1.1-7 表示调幅发射机的方框图。一般它应包括三个组成部分:高频部分、声频部分与电源部分。由于电源对发射机的工作原理没有影响,故图中略去了这一部分。

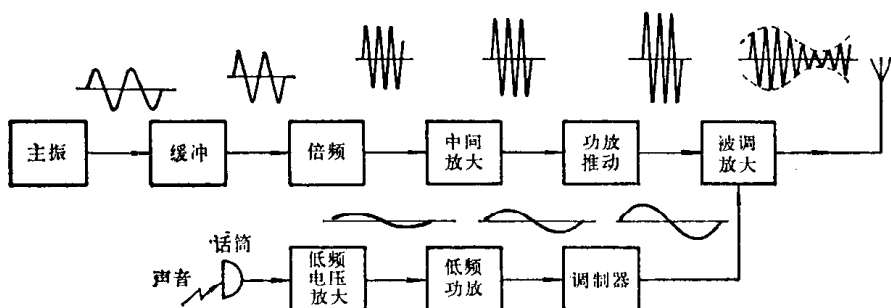


图 1.1-7 调幅发射机方框图

高频部分一般包括主振、缓冲、倍频(不一定需要)、中间放大、功放推动与末级功放(被调放大)。主振器的作用是产生稳定的载波频率。为了提高频率稳定度,主振级往往采用石英晶体振荡器,并在它后面加有缓冲级,以使主振器不受以后各级的影响。如果载波频率较高,由于晶体频率不能太高,因而在缓冲级之后还应加