

高等学校试用教材

非线性电子线路

倪福卿 董荔真 罗伟雄 编



高等教育出版社

本书是根据一九八〇年原高等学校工科电工教材编审委员会审订的《电子线路(I)(II)教学大纲(草案)》，本着“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则编写而成的。全书由高频功率放大电路、正弦波振荡电路、振幅调制电路、调幅波解调电路、角度调制电路、调角波解调电路、混频电路、反馈控制电路等章组成，每章后都附有习题。

本书可作为高等院校无线电技术类专业课程的教材，也可供从事电子线路设计、研制工作的工程技术人员参考。

本书采用国际单位制(SI)和国标(GB)。

本书经原高等学校工科电工教材编审委员会电子线路编审小组委托，由北京邮电学院梅邨副教授主审，武汉大学张肃文教授复审。同意作为试用教材出版。

责任编辑 李永和

高等学校试用教材

非线性电子线路

倪福卿 董荔真 罗伟雄 编

*

高等教育出版社出版

新华书店重庆发行所发行

重庆新华印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张14.625 字数352 000

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数00 001—2 560

书号15010·0865 定价2.65元

前 言

本书是根据1980年6月在成都召开的原高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议审订的《电子线路(I)(II)教学大纲(草案)》，结合我院本课程近几年来的教学实践，在原“非线性电子线路”讲义(1981年12月本院印刷)的基础上，贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则，作了较大的修改、补充和删节而编写的。作为四年制无线电技术类专业的本科生教材，教学时数约为80学时，本书也可供相近专业的师生参考。

本书强调了用工程近似分析方法去分析非线性电子线路的依据、条件和步骤，并以此为出发点，重点讲述各种典型非线性电子线路的基本工作原理，并注意了模拟集成电路在非线性电子线路中的应用。

全书共分八章。高频功率放大电路是以丙类谐振功率放大电路为重点，从准线性折线分析法的条件出发，阐明欠压、临界和过压三种工作状态的物理过程及特征；正弦波振荡电路则侧重于三点式振荡电路和晶体振荡电路的分析；振幅调制电路是以低电平振幅调制电路为重点，加强了单边带和脉冲振幅调制技术；调幅波解调电路是以二极管包络检波为重点，加强了同步检波和脉冲检波；角度调制电路则以调频为重点，调相技术作为间接调频的手段讲述；调角波的解调电路则侧重各种常用的鉴相和鉴频原理及其电路；混频电路的重点在于晶体三极管的叠加型混频以及混频器特有的干扰；在反馈控制电路中简要地介绍自动增益控制(AGC)、自动频率控制(AFC)及几种常用锁相环路电路，锁相环路着重于线性分析及其应用。全书各章后均附有必要的习题，部

分打星号(*)的节次可作为自学或选学内容。

本书的绪论、第一、二章由董荔真执笔;第三、四、五、六章由倪福卿执笔;第七、八章由罗伟雄执笔。陆宗逸同志对初稿的部分章节提出了修改意见。本书由北京邮电学院梅邨副教授主审,武汉大学张肃文教授复审,他们提出了许多宝贵有益的意见,在此谨表衷心的感谢。

本书虽经我院使用,但不妥和错误之处仍在所难免,恳切欢迎选用本书的师生和读者批评指正。

编 者

1986. 3. 于北京工业学院

目 录

绪论	1
第一章 高频功率放大电路	
§1-1 概述	14
§1-2 谐振功率放大器的基本工作原理	16
1-2-1 丙类工作状态效率高的原因	16
1-2-2 电路特点和基本工作原理	18
§1-3 谐振功率放大器的分析方法	20
1-3-1 准线性折线分析法的条件	20
1-3-2 谐振功率放大器的性能分析	23
1-3-3 谐振功率放大器的三种工作状态	27
§1-4 功率晶体管的高频效应及等效电路	35
1-4-1 高频效应对放大器性能的影响	35
1-4-2 高频功率晶体管的等效电路	40
§1-5 谐振功率放大器的耦合电路	41
1-5-1 耦合电路的作用与要求	41
1-5-2 耦合电路的种类和设计原则	42
1-5-3 谐振功率放大器的工程设计原则和举例	55
§1-6 已调波放大器和丙类倍频器	63
1-6-1 已调波放大器的工作原理	63
1-6-2 丙类倍频器	64
*§1-7 宽带高频功率放大器	67
1-7-1 传输线变压器的工作原理	69
1-7-2 1:4阻抗传输线变压器	72
附录1-1 余弦脉冲系数表	78

附录1-2 几种国产高频大功率晶体管典型参数	86
习题	88
参考文献	90

第二章 正弦波振荡电路

§2-1 概述	92
§2-2 LC 振荡电路	93
2-2-1 振荡原理和分析方法	93
2-2-2 分类和组成原则	98
2-2-3 晶体三极管振荡器	100
2-2-4 振荡器的偏置电路	109
2-2-5 场效应管振荡器	114
§2-3 LC 振荡电路的频率稳定性	118
2-3-1 频率稳定度的意义和定义	118
2-3-2 影响频率稳定度的因素及一般改进措施	120
2-3-3 改进的电容反馈三点式振荡器	122
§2-4 石英晶体振荡器	129
2-4-1 石英谐振器及其特性	129
2-4-2 晶体振荡器电路	135
§2-5 其它类型的正弦波振荡电路	142
2-5-1 RC 振荡器	142
2-5-2 负阻型振荡器	147
2-5-3 利用集成电路的正弦波振荡器	154
习题	155
参考文献	165

第三章 振幅调制电路

§3-1 概述	166
---------------	-----

3-1-1 调制的必要性	166
3-1-2 调幅波的频谱和调制定理	167
3-1-3 调幅波中的功率关系	172
3-1-4 抑制载波的双边带调幅信号和单边带调幅信号	172
3-1-5 低电平调幅和高电平调幅	173
§3-2 低电平振幅调制电路	175
3-2-1 二极管平衡调幅器	175
3-2-2 二极管环形调幅器	180
3-2-3 差分对管调幅器	185
§3-3 单边带信号的产生	191
3-3-1 单边带通信的优缺点	191
3-3-2 单边带信号的产生方法	192
3-3-3 单边带传输的两种制式	194
§3-4 脉冲信号的振幅调制	197
3-4-1 模拟脉冲调制的种类	197
3-4-2 高频已调脉冲序列的产生	198
附录3-1 电流波形分解系数 $\beta_{2n+1}(x)$ 数据表	199
习题	199
参考文献	203

第四章 调幅波解调电路

§4-1 概述	204
4-1-1 检波电路的作用和组成	204
4-1-2 检波电路的主要质量指标	205
4-1-3 检波电路的分类	207
§4-2 二极管包络检波器	207
4-2-1 检波的物理过程	207
4-2-2 大信号检波主要性能分析	209
4-2-3 小信号检波主要性能分析	220

4-2-4 并联二极管检波电路	224
4-2-5 实际电路举例	226
4-2-6 二极管检波器设计考虑	227
§4-3 同步检波	228
4-3-1 叠加型同步检波	228
4-3-2 乘积型同步检波	230
§4-4 脉冲检波电路	233
4-4-1 高频脉冲的检波	233
4-4-2 视频脉冲的检波	236
习题	237
参考文献	240

第五章 角度调制电路

§5-1 概述	241
5-1-1 调角波的数学表示式	241
5-1-2 调角波的频谱结构和带宽	244
5-1-3 对调频电路的性能要求	249
§5-2 直接调频电路	250
5-2-1 变容二极管直接调频电路	251
5-2-2 晶体振荡器直接调频电路	260
§5-3 间接调频电路	261
5-3-1 变容二极管调相电路	262
5-3-2 脉冲调相电路	266
5-3-3 间接调频发射机提高频偏的方法	268
附录5-1 调角波频谱分析	271
习题	274
参考文献	277

第六章 调角波解调电路

§6-1 相位检波电路	278
6-1-1 相位检波电路的作用和组成	278
6-1-2 乘积型鉴相	279
6-1-3 叠加型鉴相	285
*6-1-4 门电路鉴相	290
§6-2 斜率鉴频电路	293
6-2-1 频率检波电路的作用和组成	293
6-2-2 单失谐回路斜率鉴频器	293
6-2-3 平衡双失谐回路斜率鉴频器	295
§6-3 相位鉴频电路	298
6-3-1 原理和组成	298
6-3-2 乘积型相位鉴频器	300
6-3-3 叠加型相位鉴频器	300
§6-4 比例鉴频器	311
6-4-1 基本电路和鉴频工作过程	311
6-4-2 抑制寄生调幅的原理	315
6-4-3 实用对称比例鉴频电路举例	315
§6-5 脉冲计数式鉴频器	318
6-5-1 工作原理	318
6-5-2 实现方法	319
6-5-3 电路特点	320
§6-6 振幅限幅电路	320
6-6-1 振幅限幅器的作用、组成和特性	320
6-6-2 双晶体三极管限幅电路	322
6-6-3 双二极管限幅电路	323
习题	325
参考文献	328

第七章 混频电路

§7-1 概述	329
7-1-1 混频器的作用	329
7-1-2 混频器的组成和工作原理	330
7-1-3 混频器的质量指标	333
§7-2 晶体三极管混频器	334
7-2-1 分析方法	334
7-2-2 等效电路及其主要参数	338
7-2-3 具体电路和工作状态的选择	344
7-2-4 平衡混频器	351
§7-3 场效应管混频器	353
7-3-1 工作原理	354
7-3-2 主要参数	355
§7-4 乘积混频器	358
§7-5 混频器组合频率分量干扰	359
7-5-1 干扰哨叫	361
7-5-2 寄生通道干扰	366
7-5-3 减小干扰哨叫和寄生通道干扰的方法	368
§7-6 非线性电路中的其它干扰	370
7-6-1 交叉调制	370
7-6-2 互相调制	371
7-6-3 强信号阻塞和强干扰阻塞	374
7-6-4 倒易混频	376
习题	376
参考文献	380

第八章 反馈控制电路

§8-1 锁相环路的线性分析	382
----------------	-----

8-1-1 锁相环路的组成和作用原理	382
8-1-2 环路的基本传输函数	384
8-1-3 线性环路的稳态误差及稳定性	390
8-1-4 线性环路的频率响应和暂态响应	400
8-1-5 线性环路的噪声性能	406
§8-2 锁相环路的非线性分析	410
8-2-1 锁相环路锁定, 失锁和牵引过程	412
8-2-2 一阶环路的相图分析	414
*8-2-3 有源比例积分滤波器二阶环路在固定频率输入时的相图分析	417
8-2-4 辅助捕捉方法	420
*§8-3 锁相环路的应用	424
8-3-1 锁相接收机	424
8-3-2 锁相鉴频	426
8-3-3 同步信号提取	431
8-3-4 频率合成器	434
§8-4 自动频率控制(AFC)电路	437
8-4-1 AFC电路的工作原理和模型	437
8-4-2 AFC电路的剩余频差和跟踪特性	439
§8-5 自动增益控制(AGC)电路	442
8-5-1 自动增益控制的必要性	442
8-5-2 自动增益控制的方法	443
8-5-3 AGC电路的分析	448
习题	451
参考文献	453

绪 论

实际的电路元件按其特性可分为两大类,即线性元件和非线性元件.凡是特性可表征为通过原点的直线的元件称为线性元件,否则称为非线性元件.只要包含有一个非线性元件的电路就称为非线性电路.常见的欧姆电阻器、平板电容器和空心电感线圈等都是线性元件,它们的特性都可以用一个常数即电阻 R 、电容 C 和电感 L 来描述,因为欧姆电阻器的伏安特性、平板电容器的伏库特性和空心电感器的磁化特性都是如图0-1所示通过原点的一条直线,直线的斜率就是 R, C, L 的数值.而非线性电阻器、非线性电容器和非线性电感器的特性则不能用一个简单的数值来描述,因为它们的特性不再是通过原点的一条直线.常见的非线性元件如结型

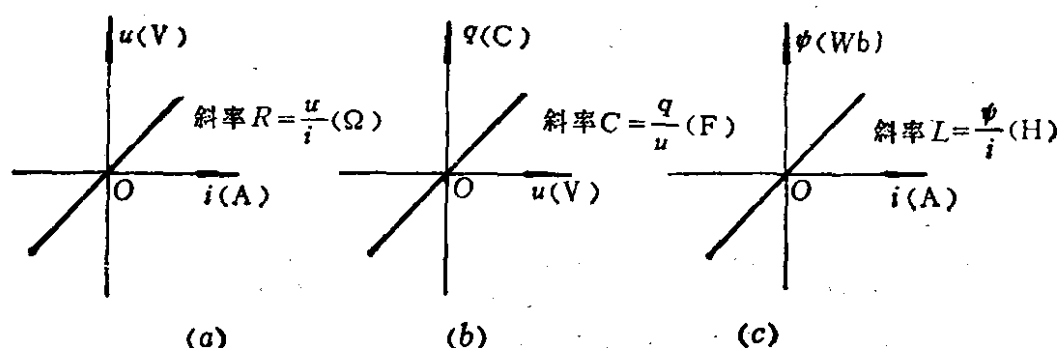


图0-1 线性电阻器、电容器和电感器的特性曲线

二极管、金属氧化物半导体(MOS)电容器和带有磁心的线圈等,它们的特性曲线如图0-2所示.非线性元件特性的表达式是非线性函数.从图0-2看出非线性电阻器的电阻值与流过电阻器的电流或加在它两端的电压有关.同样,非线性电容器的电容值与非线性电感器的电感值分别与器件的外加电压及流过器件的电流有关.因此,表征非线性元件特性的参数不仅是工作点的函数,而且在直流和交流工作状态下的参数值也不等,这是和线性元件的不同

点。通常用静态参数和动态参数分别表示非线性元件在直流和交流工作状态下的特性。例如,非线性电阻器的静态电阻(或称直流电阻)是伏安特性曲线上任意一点 $Q(U_Q, I_Q)$ 处电压和电流的比值〔如图0-2(a)所示〕,可表示为

$$R_{dc} = \frac{u}{i} \bigg|_{u=U_Q} \quad (0-1)$$

动态电阻(或称交流电阻)则为该点切线斜率的倒数,可表示为

$$R_{ac} = \frac{du}{di} \bigg|_{u=U_Q} = \lim_{\Delta u \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta i} \bigg|_{u=U_Q} \quad (0-2)$$

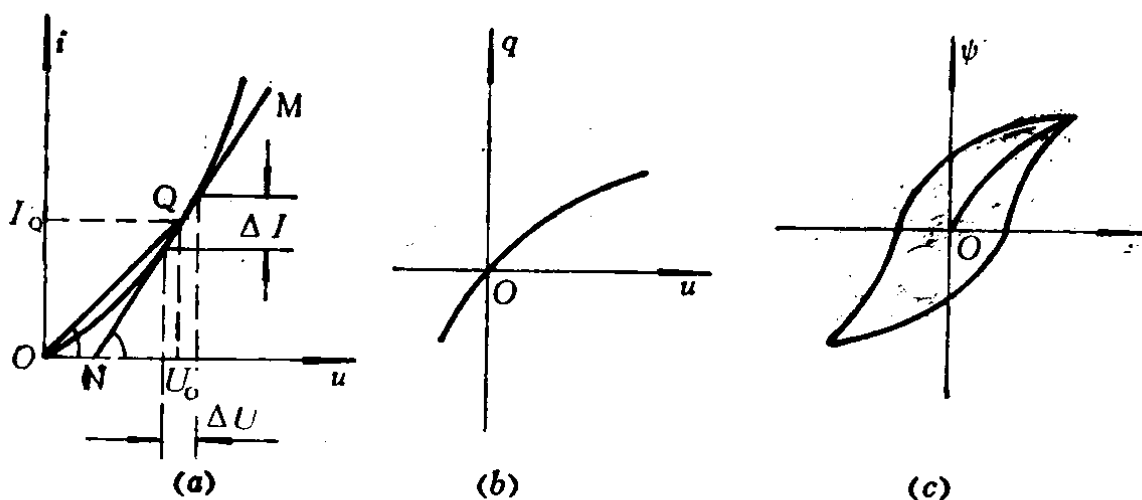


图0-2 非线性电阻器、电容器和电感器的特性曲线

(a) 结型二极管的伏安特性; (b) MOS电容器的伏库特性;
(c) 磁心电感线圈的磁化特性

同样,非线性电容器的静态和动态电容可分别表示为

$$C_{dc} = \frac{q}{u} \bigg|_{u=U_Q} \quad \text{及} \quad C_{ac} = \frac{dq}{du} \bigg|_{u=U_Q} \quad (0-3)$$

非线性电感器的静态和动态电感分别表示为

$$L_{dc} = \frac{\psi}{i} \bigg|_{i=I_Q} \quad \text{及} \quad L_{ac} = \frac{d\psi}{di} \bigg|_{i=I_Q} \quad (0-4)$$

对于具有非单值特性曲线的非线性元件还应注明控制变量,例如,

图0-3(a)所示的隧道二极管伏安特性曲线表明,它具有电流是电压单值函数的特性,因此是一个压控非线性电阻器,而图0-3(b)所示的双基极二极管的特性,则表明是一个流控非线性电阻器,因为器件的端电压是流过器件电流的单值函数。同样,非线性电容器和电感器也有压控与荷控以及流控与链控之分。

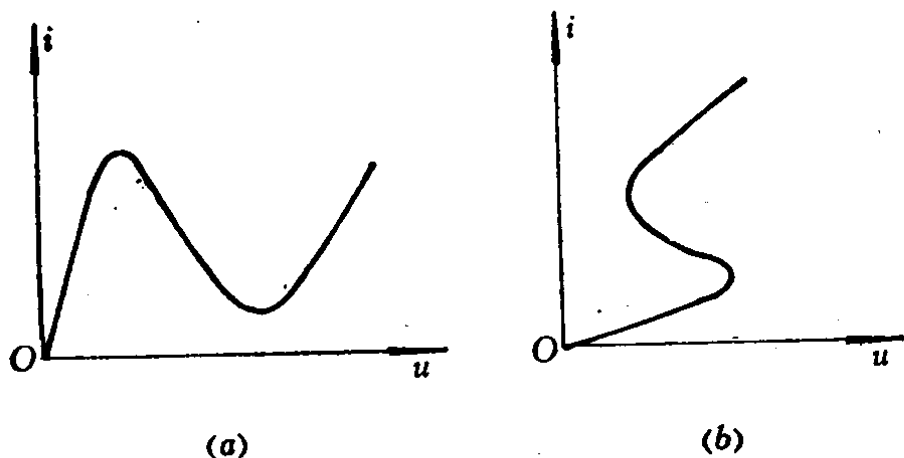


图0-3 压控与流控非线性电阻器的特性
(a) 隧道二极管特性;(b) 双基极二极管特性

对于线性电路,当有两个不同频率的信号同时作用于电路时,可以利用叠加原理求出电路的响应。包含有晶体三极管的电路,在输入信号幅度足够小时可以用工作点处的切线来代替曲线[如图0-2(a)中所示],因此对于输入小信号而言,三极管在工作点Q处可视为线性元件。线性电子线路的分析正是以这点为基础,因此一切有关线性电路的定理均可应用。但是,当输入信号幅度足够大,以致晶体三极管在工作点处的特性呈非线性时,该电路则是一个非线性电子线路,而非线性电子线路不满足叠加原理。例如,若非线性电阻器的特性可表示为 $i = au^2$,当器件两端作用有两个不同频率的余弦电压 $u_1 = U_{1m}\cos\omega_1 t$ 和 $u_2 = U_{2m}\cos\omega_2 t$ 时,则流过器件的电流是

$$\begin{aligned} i &= a(u_1 + u_2)^2 = a(u_1^2 + 2u_1u_2 + u_2^2) \\ &= \frac{a}{2}(U_{1m}^2 + U_{2m}^2) + \frac{a}{2}U_{1m}^2\cos 2\omega_1 t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{a}{2} U_{2m}^2 \cos 2\omega_2 t + a U_{1m} U_{2m} \cos(\omega_1 + \omega_2) t \\
 & + a U_{1m} U_{2m} \cos(\omega_1 - \omega_2) t
 \end{aligned}$$

显然,它与用叠加原理得出的结果

$$\begin{aligned}
 i &= au_1^2 + au_2^2 = \frac{a}{2} (U_{1m}^2 + U_{2m}^2) + \frac{a}{2} U_{1m}^2 \cos 2\omega_1 t \\
 & + \frac{a}{2} U_{2m}^2 \cos 2\omega_2 t
 \end{aligned}$$

是不同的,它不仅包含直流分量和激励信号频率的二次谐波,还包含激励信号频率的和频与差频分量。

从上面的简单例子看出,非线性元件的输出电流中包含有与输入激励信号频率不同的频率分量,即有频率变换的作用。因此,非线性电子线路在电子设备中有着广泛的应用,例如,在无线电通信系统中,非线性电子线路更是必不可少的组成部分。图0-4给出了调幅无线电收、发信机的典型框图。

一个含有信息的低频信号,欲通过空间直接进行远距离的传输,几乎是不可能的,因为低频电磁波传输的损耗很大,而且为了有效的发射低频信号所必须的天线尺寸也大得不可想象,同时,也不便于多个信息同时传输。为了克服上述困难,通常将低频信号通过高频电磁波经天线发送出去。图0-4(a)给出了调幅无线电发射机的框图及相应的波形。振荡器用来产生高频等幅信号,令高频信号的某个参数,例如幅度(也可以是频率或相位)按照低频信号的规律变化,然后将这一含有信息的高频信号放大到所需要的功率电平,再通过适当型式的天线发射出去。由于高频等幅信号的作用有如运载工具,故称为载波〔见图0-4(a)中a点波形〕,低频信号控制载波某个参数的过程称为调制,实现这一过程的电路称为调制器,所产生的信号称为已调波〔见图0-4(a)中b点波形〕,控制载波的低频信号称为调制信号。接收时为了获取信息,必须从

高频已调波中不失真地恢复出调制信号,它是调制的逆过程,称为解调,对于调幅波的解调称为检波〔解调波形如图0-4(b)中d点所示〕。为了提高接收机的灵敏度和选择性,通常不是采用对高频已调波直接进行检波,或简单地在检波前加高频放大器,而是采用如图0-4(b)所示的超外差式接收机。由于采用了与所接收已调波信号频率不同的高频振荡信号和接收信号相混合,从而产生频率较低的固定中频已调波信号〔见图0-4(b)中b点波形〕,因此称为外差式接收,这一过程称为混频。又由于混频输出的中频信号经过中频放大器放大再进行检波,从而大大提高了接收机的选择性,所以称它为超外差式接收。为了区别于发射机中的振荡器,通常将接收机中所用的振荡器称为本地振荡器。由检波器所得到的低频信号再通过适当的低频放大即可送至终端负载。

从收、发信机框图中的信号传输过程可以看出,除了低频放大

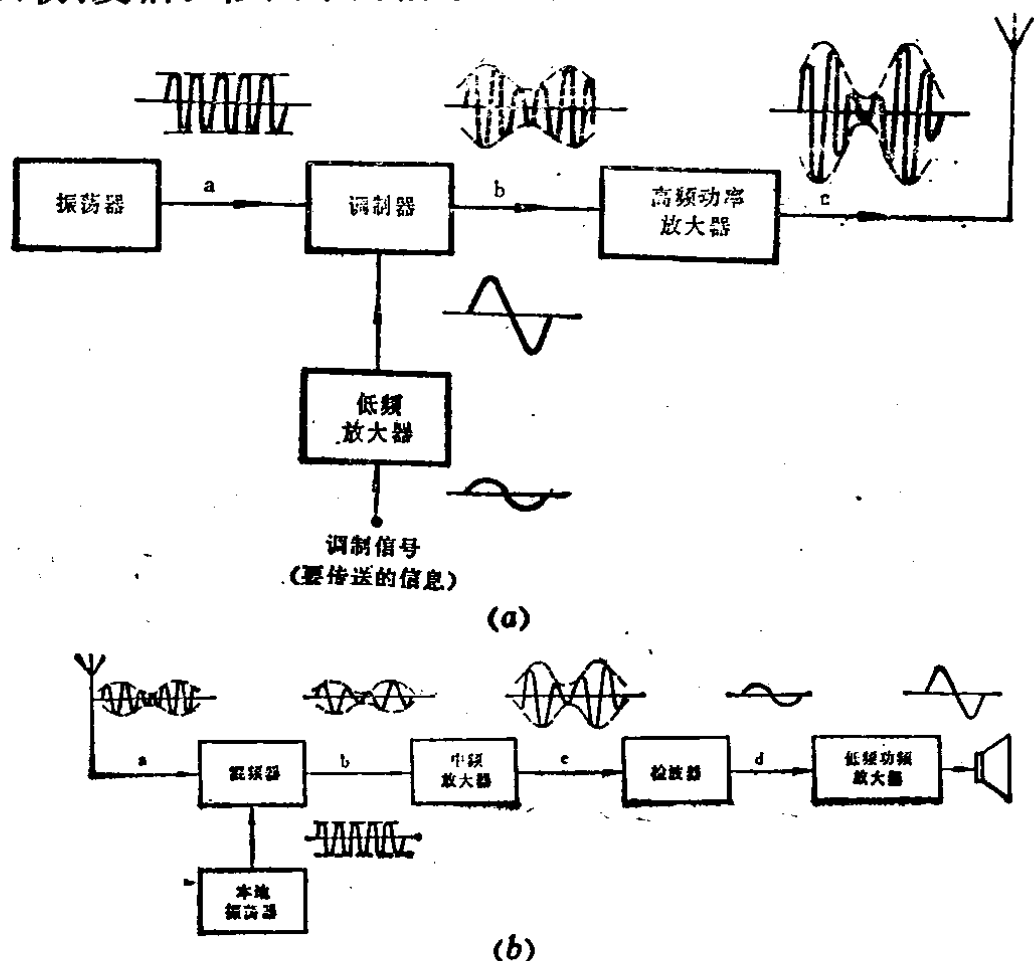


图0-4 调幅无线电收、发信机的典型框图

器和中频放大器是线性电路以外,振荡器、调制器、混频器和检波器都是非线性电路,这些电路的输出信号与输入信号相比较,波形和频率分量都不同。正因为在这类电路中都含有工作在非线性状态的有源器件(如晶体三极管、场效应管等),所以才能完成信号的产生(振荡器)和频率变换(调制器、混频器和检波器)的作用。需要指出的是,在收、发信机中的低频和高频功率放大器,从完成的功能来看是线性放大器,但为了提高放大器的效率,有源器件多工作在甲乙类(低频功率放大)和丙类甚至丁类、戊类(高频功率放大),因此严格地说,这种低频和高频功率放大器也属于非线性电子线路。

由于非线性电子线路中的有源器件工作在非线性特性区域,因此在线性电子线路中采用的晶体三极管微变等效电路(如 h 参数, y 参数及混合 π 参数等效电路),在这里均不适用;其次,由于非线性电子线路不满足叠加原理,这使得分析多输入情况下电路的响应复杂化,因此,对于非线性电子线路,必须建立一套完全不同于线性电子线路的分析方法。

对于任意一种网络,只要能列出描述网络的方程,则方程的解就是网络的解。只要知道构成网络的元件特性,利用KVL和KCL,按照网络的拓扑结构就可以列出网络的方程。一个完全由线性电阻器构成的电路称为线性电阻网络,它的网络方程是线性代数方程。包含有线性电感器或线性电容器的网络称为线性动态网络,它的网络方程是常系数线性微分方程,因为线性电感器和线性电容器(统称线性动态元件)的端电压和电流之间是微分关系,可分别表示为

$$u_L = -L \frac{di_L}{dt} \quad \text{和} \quad i_C = C \frac{du_C}{dt}$$

对于非线性电阻网络而言,由于非线性电阻器的端电压和电流之