

高等学校教材

高频电子线路

(第二版)

下册

张肃文 主编

高等教育出版社

高等学校教材

高频电子线路

(第二版)

下册

张肃文 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是在第一版基础上,遵循“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,按照教育部审定的高等工业学校《电子线路(I)(II)教学大纲(草案)》修订而成的。作为高等学校无线电技术类专业的教材,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,引入了一些较新的内容,注意理论联系实际。各章附有思考题、习题及部分习题答案。

全书共十三章,分上、下册。

上册内容有无线电信号传输原理、串并联谐振回路和耦合回路、高频小信号放大器、放大电路的噪声、非线性与时变参量电路分析方法、高频功率放大器、正弦波振荡器。

下册内容有振幅调制、振幅解调、变频、参变现象与时变电抗电路、角度调制、调频信号的解调、反馈控制电路与频率合成技术。

责任编辑 谭骏云

高等学校教材
高频电子线路

(第二版)

下 册

张肃文 主编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京新华印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张14 字数 338,000

1980年12月第1版 1984年3月第2版

1984年9月 第1次印刷

印数 00,001—16,800

书号 15010·0574 定价 2.15 元

目 录

第七章 振幅调制	515
§ 7.1 概述	515
§ 7.2 调幅波的性质	520
7.2-1 调幅波的波形	520
7.2-2 调幅波的数学表示式	522
7.2-3 调幅波的频谱	524
7.2-4 调幅波中的功率关系	529
§ 7.3 平方律调幅	530
7.3-1 工作原理	530
7.3-2 平衡调幅器	533
§ 7.4 差分对振幅调制器	536
§ 7.5 斩波调幅	539
7.5-1 工作原理	539
7.5-2 实现斩波调幅的两种电路	542
Δ§ 7.6 单边带信号的产生	544
7.6-1 单边带通信的优缺点	544
7.6-2 产生单边带信号的方法	545
§ 7.7 已调波放大	553
§ 7.8 集电极调幅	557
7.8-1 工作原理	557
7.8-2 调制特性	561
7.8-3 功率与效率	563
§ 7.9 基极调幅	569
7.9-1 工作原理	569
7.9-2 工作状态的选择	571
7.9-3 功率与效率	572
§ 7.10 多重调制原理	576
7.10-1 两级集电极调制电路	578
7.10-2 集电极-发射极双重调制	579

参考资料	580
思考题与习题	581
第八章 调幅信号的解调(检波)	583
§ 8.1 概述	583
8.1-1 检波器的作用和分类	583
8.1-2 对检波器的要求——质量指标	585
§ 8.2 小信号检波(平方律检波)	588
8.2-1 工作原理	588
8.2-2 小信号检波器的主要质量指标和优缺点	590
 § 8.3 大信号检波(峰值包络检波)	591
8.3-1 大信号检波器的工作原理	592
8.3-2 大信号检波器的定量分析	594
8.3-3 大信号检波器的质量指标	598
*8.3-4 元件选择与设计原则	608
 8.3-5 二极管并联检波器	612
 *8.3-6 视频检波和脉冲检波的特点	613
§ 8.4 乘积检波器	618
8.4-1 乘积检波器的工作原理和应用	619
8.4-2 平衡型乘积检波器及其电路	622
8.4-3 本地载波的产生方法以及频率和相位关系	623
* § 8.5 单边带信号的接收	624
参考资料	627
思考题与习题	627
 第九章 变频	630
§ 9.1 变频器的作用、工作原理和质量指标	630
9.1-1 概述	630
9.1-2 变频器的作用	631
9.1-3 变频器的工作原理	633
9.1-4 变频器的质量指标	638
§ 9.2 晶体管混频器	640
9.2-1 工作原理和电路组态	640
9.2-2 晶体管混频器的分析	642
9.2-3 晶体管混频器和变频器的具体电路以及工作状态的选择	656

§ 9.3 二极管平衡混频器和环形混频器	660
9.3-1 二极管平衡混频器的工作原理	661
9.3-2 二极管(单管)开关混频原理	662
9.3-3 二极管平衡混频器开关状态的应用	667
9.3-4 环形混频器(或称双平衡混频器)	668
9.3-5 分裂式平衡混频器	673
§ 9.4 差分对混频器	676
§ 9.5 混频器的干扰	677
9.5-1 组合频率干扰(干扰哨声)和副波道干扰	677
9.5-2 交叉调制(交调)	681
9.5-3 互相调制(互调)	683
9.5-4 阻塞干扰	685
9.5-5 相互混频(或称“倒易混频”、“噪声调制”)	686
9.5-6 克服干扰的措施	687
参考资料	696
思考题与习题	696
第十章 参量现象与时变电抗电路	700
§ 10.1 概述	700
§ 10.2 参量放大原理	701
10.2-1 变容二极管的非线性特性	701
10.2-2 时变参量器件能量转换的物理过程	702
10.2-3 非简并式参量放大器电路	706
10.2-4 非线性电容中的能量转换关系	709
§ 10.3 参量混频器	712
10.3-1 参量混频原理	712
10.3-2 参量混频器电路	714
§ 10.4 参量倍频器	715
10.4-1 变容二极管倍频器	716
10.4-2 晶体三极管参量倍频器	721
§ 10.5 参量自激效应及其消除	722
10.5-1 参量自激现象及其危害	723
10.5-2 参量自激原理和消除参量自激的方法	724
参考资料	726

思考题与习题	727
第十一章 角度调制	729
§ 11.1 概述	729
§ 11.2 调角波的性质	730
11.2-1 瞬时频率与瞬时相位	730
11.2-2 调频波和调相波的数学表示式, 频移和相移	732
11.2-3 调频波和调相波的频谱和频带宽度	737
△ § 11.3 调频方法概述	746
11.3-1 直接调频原理	746
11.3-2 间接调频原理	747
△ § 11.4 变容二极管调频	748
11.4-1 基本原理	748
11.4-2 电路分析	750
§ 11.5 电抗管调频	759
* § 11.6 三角波调频	768
* § 11.7 方波调频	773
§ 11.8 晶体振荡器直接调频	776
§ 11.9 间接调频: 由调相实现调频	781
11.9-1 调相的方法	782
11.9-2 间接调频的实现	787
附录 11.1 将 $(1+m\cos\Omega t)^\gamma$ 展开成泰勒级数	790
附录 11.2 频偏较大时变容二极管调频电路的分析	790
参考资料	791
思考题与习题	792
第十二章 调角信号的解调	797
§ 12.1 概述	797
△ § 12.2 相位鉴频器	799
12.2-1 相位鉴频器的工作原理	799
12.2-2 相位鉴频器回路参数的选择	804
12.2-3 电容耦合相位鉴频器	806
§ 12.3 比例鉴频器	811
12.3-1 引言	811
12.3-2 比例鉴频器的工作原理	812

12.3-3 比例鉴频器的实际电路	816
* § 12.4 晶体鉴频器	817
* § 12.5 其他形式的鉴频器	821
12.5-1 脉冲计数式鉴频器	821
12.5-2 符合门鉴频器	824
§ 12.6 限幅器	830
12.6-1 引言	830
12.6-2 二极管限幅器	832
12.6-3 晶体三极管限幅器	833
12.6-4 差分对限幅器	837
* § 12.7 调频制的抗干扰性	838
12.7-1 引言	838
12.7-2 调频制抗干扰性能获得改善的原因	838
12.7-3 预加重-去加重技术	843
附录 12.1 式(12.2-18)的推导	845
参考资料	846
思考题与习题	847
 第十三章 反馈控制电路与频率合成技术	849
§ 13.1 自动增益控制(AGC)	849
§ 13.2 自动频率微调(AFC)	853
13.3 锁相环路的基本工作原理	858
13.4 锁相环路各部件及其数学模型	861
13.4-1 鉴相器	862
13.4-2 低通滤波器	871
13.4-3 压控振荡器(VCO)	874
13.4-4 锁相环路的数学模型	876
* § 13.5 锁相环路的分析	878
13.5-1 一阶锁相环路	878
13.5-2 二阶锁相环路	889
* § 13.6 锁相环路的应用简介	896
13.6-1 窄带跟踪接收机(锁相接收机)	897
13.6-2 锁相环路的调频与解调	898
13.6-3 调幅信号的解调	900

13.6-4 振荡器的稳定与提纯	901
13.6-5 倍频器与分频器	901
13.6-6 相关应答器	903
§ 13.7 频率合成器的主要技术指标	905
§ 13.8 频率直接合成法	912
13.8-1 非相干式直接合成器	912
13.8-2 相干式直接合成器	914
13.8-3 频率漂移抵消法(外差补偿法)	916
§ 13.9 频率间接合成法(锁相环路法)	917
13.9-1 脉冲控制锁相法	918
13.9-2 间接合成制减法降频(模拟锁相环路法)	919
13.9-3 间接合成制除法降频(数字锁相环路法)	923
附录 13.1 一阶环路方程的解(只求锁定状态)	930
附录 13.2 一阶环路在小扰动下的捕捉时间	931
参考资料	932
思考题与习题	933
习题答案(下册部分)	934
符号表	937

第七章 振幅调制

§ 7.1 概 述

传输信息是人类生活的重要内容之一。传输信息的手段很多,这在绪论一章已简略叙及。利用无线电技术进行信息传输在这些手段中占有极重要的地位。无线电通信、广播、电视、导航、雷达、遥控遥测等等,都是利用无线电技术传输各种不同信息的方式。无线电通信传送语言、电码或其它信号;无线电广播传送语言、音乐等;电视传送图像、语言、音乐;导航是利用一定的无线电信号指引飞机或船舶安全航行,以保证它们能平安到达目的地;雷达是利用无线电信号的反射来测定某些目标(如飞机、船舶等)的方位;遥控遥测则是利用无线电技术来量测远处或运动体上的某些物理量,控制远处机件的运行等。在以上这些信息传递的过程中,都要用到调制与解调。

在绪论中已经简略说明,所谓调制,就是在传送信号的一方(发送端)将所要传送的信号(它的频率一般是较低的)“附加”在高频振荡上,再由天线发射出去。这里,高频振荡波就是携带信号的“运载工具”,所以也叫载波。

在接收信号的一方(接收端)经过解调(反调制)的过程,把载波所携带的信号取出来,得到原有的信息。反调制过程也叫检波。

调制与解调都是频谱变换的过程,必须用非线性元件才能完成。这在第四章中已讲过了。

我们自然会提出这样的问题:难道不能够直接把信号发射出去吗?为什么一定要经过调制的过程?这里的关键问题是所要传送

的信号频率或者太低(例如言语和音乐都限于音频范围内),或者频带很宽(例如电视信号频宽从 50 Hz 至 6.5 MHz)。这些都对直接采用电磁波的形式传送信号十分不利,原因是:

1) 天线要将低频信号有效地辐射出去,它的尺寸就必须很大。例如,频率为 1000 Hz 的电磁波,其波长为 300,000 m,即 300 公里。如果采用 $1/4$ 波长的天线,则天线的长度应为 75,000 m,相当于 150 华里。不用说,实际上这是难于办到的。

2) 为了使发射与接收效率高,在发射机与接收机方面都必须采用天线和谐振回路。但语言、音乐、图像信号等的频率变化范围很大,因此天线和谐振回路的参数应该在很宽范围内变化。显然,这又是难于做到的。

3) 如果直接发射音频信号,则发射机将工作于同一频率范围。这样,接收机将同时收到许多不同电台的节目,无法加以选择。

为了克服以上的困难,必须利用高频振荡,将低频信号“附加”在高频振荡上。这样,就使天线的辐射效率提高,尺寸缩小;同时,每个电台都工作于不同的载波频率,接收机可以调谐选择不同的电台。这就解除了上述的种种困难。

所谓将信号“附加”在高频振荡上,就是利用信号来控制高频振荡的某一参数,使这个参数随信号而变化。这就是调制。绪论中已指出,调制的方式可分为连续波调制与脉冲波调制两大类。连续波调制是用信号来控制载波的振幅、频率或相位,因而分为调幅、调频和调相三种方法。脉冲波调制是先用信号来控制脉冲波的振幅、宽度、位置等,然后再用这已调脉冲对载波进行调制。脉冲调制有脉冲振幅、脉宽、脉位、脉冲编码调制等多种形式。本书只讨论连续波调制,脉冲波调制在后续课程中讨论。

对不同的调制方式和实现调制的方法进行比较时,应从以下几项指标来考虑:

1) 抗干扰性 在无线电信号的传送过程中,不可避免地要受到各种干扰的影响,因此通信距离和通信的可靠性在很大程度上决定于通信方式的抗干扰能力。干扰对于信号的影响视其强度、性质以及波段而定。使用不同的调制方法,这个影响也是不同的。一般说来,脉冲编码调制(PCM)^①的抗干扰能力最强,调频与调相次之,调幅的抗干扰能力最弱。

2) 实现调制的简便程度 从这方面来说,调幅最易实现,脉冲编码调制等方法则复杂得多。

3) 已调波信号所占的频带宽度 使用不同的调制方法来发射同样的信号,所占据的频带宽度是不同的。调幅制所占的频带宽度等于信号最高频率的两倍,属于窄带调制。脉冲调制或宽带调频等所占的频带宽度则大大超过最高信号频率。这些属于宽带调制。

4) 电子器件的效率和输出功率 用不同的调制方法,有不同的效率和输出功率。

5) 保真度 按理说,各种调制方法都能保证达到所要求的保真度,但实施调制的简便程度以及发射机的大小和重量却有所不同。

在选择调制方式与方法时,要全面综合考虑。例如,调幅制适用于长、中、短与超短波段,接收设备最简单,因而广泛用于无线电广播。调频制抗干扰能力强,但由于频带宽,因而只适用于超短波段,如通信、电视伴音等。

判断调幅发射机的信号传送质量,可用以下几个指标:

- 1) 调制特性(非线性失真);
- 2) 调制的频率特性(线性失真);

① PCM 为 Pulse Code Modulation 的缩写。

3) 噪声电平。

调制特性可以用静态调制特性曲线与动态调制特性曲线来描述。

所谓静态调制特性曲线,就是集电极高频电流 I_{c1} 与各电极直流电压的关系。例如,集电极调制是利用音频调制信号电压控制集电极电压,使集电极输出的高频电流 I_{c1} 发生变化,以获得已调波输出(详细讨论见 § 7.8 节)。它的静态调制特性曲线就是如图 7.1-1 所示的 $I_{c1}=f(V_c)$ 的关系曲线。在求静态调制特性曲线时,没有加入音频调制电压 V_a ,而是通过逐步改变集电极直流电压来代替 V_a 所起的作用,逐点求出 I_{c1} 的大小。由于这不是真正的调制过程,因而没有边频存在,输出中只有载波频率,也就不存在集电极谐振回路对边频的失调问题。因此,静态调制特性曲线不能完全反映实际的调制过程。通常调制信号角频率 Ω 要比载波角频率 ω_0 低得多,因此对载波来说,调制信号的变化是很缓慢的,可以认为在载波电压交变的一周内,调制信号电压基本上不

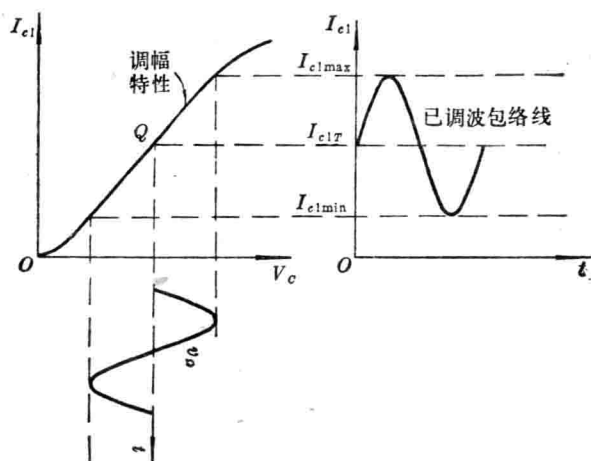


图 7.1-1 集电极调幅静态特性曲线以及如何用它来正确选定工作点

变。这样，静态调制特性曲线仍然能正确反映调制的过程。我们可以利用它来确定已调波包络的非线性失真的大小。由图 7.1-1 显然可知，为了减小非线性失真，在未加调制信号时的工作点 Q 应选在调制特性曲线直线段的中央。工作点偏高或偏低，都会使已调波产生包络失真。

动态调制特性曲线包括振幅特性曲线和频率特性曲线。在调制频率不变（一般取为 400 或 1000 Hz）的情况下，改变调制电压的振幅 V_a 所得到的调幅度 m_a 与调制电压振幅之间的关系曲线，即为振幅特性曲线，如图 7.1-2(a) 所示。一般可用它来衡量调幅时的包络失真（非线性失真）。对于广播发射机来说，它对非线性失真的要求很严格。如调制度为 100%、调制频率为 1000 Hz 时，允许的非线性失真系数一般为 2~3%。对于通信机来说，要求低一些。通常在 $m_a=80\sim95\%$ 时，非线性失真系数应小于 10%。

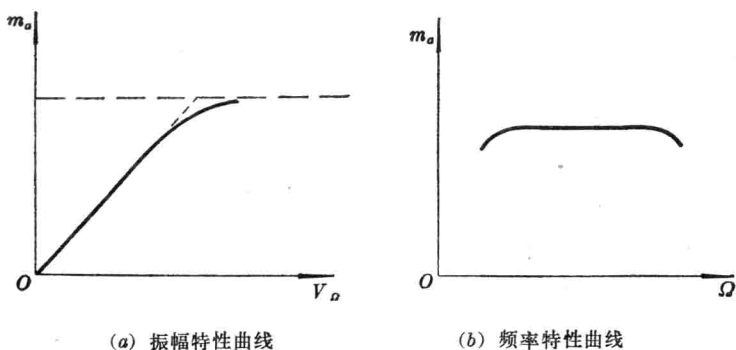


图 7.1-2 动态调制特性曲线

维持调制电压振幅不变，改变调制频率 Ω 所得到的调幅度与调制频率之间的关系曲线，即为频率特性曲线，如图 7.1-2(b) 所示。这条曲线可用来衡量已调波的频率失真。由于频率失真一般是由电路中的线性元件（电容、电感等）所引起的，所以它也叫线性失真。

噪声电平一般定义为没有调制信号时, 由于噪声所产生的寄生调幅度与信号最大时的调幅度之比, 后者往往取为 1。在广播发射机中, 允许的噪声电平约为 0.1%, 即噪声所产生的寄生调幅度比信号所产生的最大调幅度应低 60 dB。在通信机中, 这一指标可以低一些。

最后, 我们简略介绍实现调幅的方法, 大约有以下几种:

1. 低电平调幅 调制过程是在低电平级进行的, 因而需要的调制功率小。属于这种类型的调制方法有:

1) 平方律调幅 利用电子器件的伏安特性曲线平方律部分的非线性作用进行调幅。

2) 斩波调幅 将所要传送的音频信号按照载波频率来斩波, 然后通过中心频率等于载波频率的带通滤波器滤波, 取出调幅成份。

3) 模拟乘积调幅 这是利用输出等于两个输入信号乘积的电路, 来实现调幅。

2. 高电平调幅 调制过程在高电平级进行, 通常是在丙类放大器中进行调制。属于这一类型的调制方法有:

1) 集电极(阳极)调幅;

2) 基极(控制栅极)调幅。

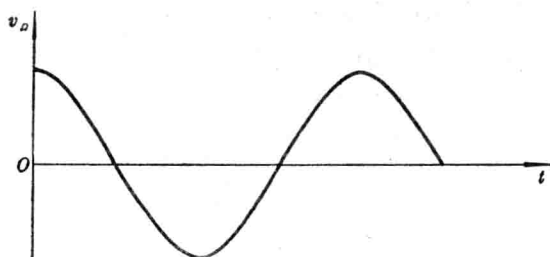
由于调制的过程是把信号从低频移到载波频率两侧的频率搬移过程, 必须采用非线性元件才能实现。因此, 以上几种调幅都是用非线性器件(晶体管或电子管)完成的。在研究各种调幅方法之前, 应先研究调幅波的基本性质, 作为本章的基础。

§ 7.2 调幅波的性质

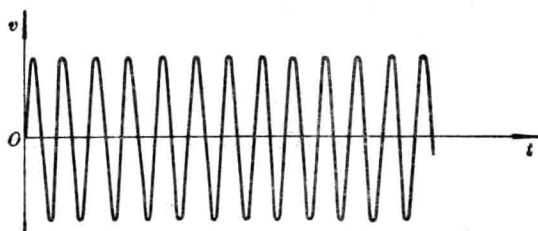
7.2-1 调幅波的波形

我们已经知道, 调制的过程就是使高频振荡(载波)的某一参

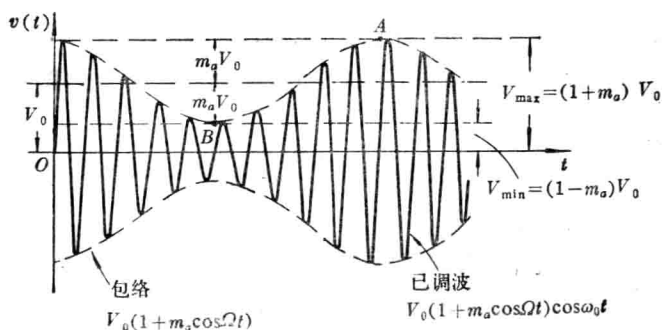
数(振幅、频率或相位)随着所要传送的信号变化规律而变化,以此达到传送信号的目的。经过调制后的高频波(已调波),它的波形和频谱都与原来的载波不同,因此调制的过程也就是波形和频谱变换的过程。所谓调幅,就是使载波的振幅随着调制信号的变化



(a) 调制信号 $v_a = V_a \cos \Omega t$



(b) 载波 $v = V_0 \cos \omega_0 t$



(c) 调幅波形

图 7.2-1 调幅波的形成(正弦调制)

规律而变化。例如,图 7.2-1 就是当调制信号是正弦波形^①时,调幅波的形成过程。由图可以看出,调幅波是载波振幅按照调制信号的大小成线性变化的高频振荡。它的载波频率维持不变,也就是说,每一个高频波的周期是相等的,因而波形的疏密程度均匀一致,与未调制时的载波波形疏密程度相同。

应该说明,通常所要传送的信号(如语言、音乐等)的波形是很复杂的,包含了许多频率成分。但为了简化分析手续,在以后分析调制时,可以认为信号是正弦波形。因为复杂的信号可以分解为许多正弦波分量,因此,只要已调波能够同时包含许多不同调制频率的正弦调制信号,那么,复杂的调制信号也就如实地被传送出去了。

7.2-2 调幅波的数学表示式

由上节知,调幅波的特点是载波的振幅受调制信号的控制作周期性的变化。这变化的周期与调制信号的周期相同,而振幅变化则与调制信号的振幅成正比。现在我们就来进一步分析调幅波的特点。

为简化分析手续起见,假定调制信号是简谐振荡,其表示式为

$$v_D = V_D \cos \Omega t \quad (7.2-1)$$

如果用它来对载波 $v = V_0 \cos \omega_0 t$ 进行调幅,那么,在理想的情况下,这已调波的振幅为

$$V(t) = V_0 + k_a V_D \cos \Omega t \quad (7.2-2)$$

式中, k_a 为比例常数。

因此,已调波可以用下式表示:

$$v(t) = V(t) \cos \omega_0 t$$

^① 正弦函数与余弦函数的性质相同,因此由它们所表示的波形可统称为正弦波,不必加以区别。