

高频电路 上册

清华大学通信教研组

人民邮电出版社

TN 7
9

高 频 电 路

上 册

清华大学通信教研组

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书讨论无线电高频(射频、中频)电路的基本工作原理、分析方法和测试方法。联系实际选取通信、电视、雷达设备中的一些典型电路作为分析对象,并给出计算实例。

本书上册讨论谐振回路、调谐放大与宽带中放、非线性与参变电路分析、高频功率放大与倍频、自激振荡;下册讨论调幅检波、调频鉴频、数字信号的调制与解调、混频、噪声、场效应管高频电路以及自动增益控制、自动频率调节、电调谐与锁相环路等。

本书可作为高等院校无线电技术类专业高频电路课程的教材或参考书,也可供本专业设计和技术人员参考。

高 频 电 路 上 册

清华大学通信教研组

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32 1979年2月第 一 版
印张: 19 8/32 页数: 308 1983年12月河北第8次印刷
字数: 510 千字 印数: 54,501—70,500 册

统一书号: 15045·总2268—无659

定价: 2.00 元

前 言

随着无线电技术的发展，无线电基础方面的教学内容和体系正在不断更新。

为了加强基础理论，一九六五年我们试行组织“高频电路”课程，把曾经分散在几门课中的有关内容，集中在这门课程内讲授。一九七三年编写了“高频电路”讲义。在最近几年的教学实践中，陆续对此教材作了一些修改。一九七七年，我们又对这本讲义作了较大的补充和整理，编成本书。暂作“高频电路”课程的教材，或供工厂、部队和研究单位的有关同志们参考。

在编写时，我们力求作到深入浅出，对于理论分析，既注意讲清物理概念，又注意使分析计算过程较为详细和连贯，因而便于读者自学。

本书主要介绍无线电高频（射频和中频）电路的工作原理、分析方法和测试方法。为了密切理论和实际的联系，尽量选用各种无线电设备中的典型电路，作为讨论的对象，并给出一些计算实例，希望读者能深入掌握它们的基本原理和基本概念，并了解它们的实际应用。至于具体电路的设计方法和步骤则不是我们所要讨论的主要问题。

在绪论这一章中，我们以无线电通信系统为例，说明典型的无线电设备的组成和工作过程，阐述各种部件的作用与原理，并介绍一些术语和基本概念，使读者对本书所要讨论的主要问题以及它们的相互关系，能有初步的了解。

谐振回路是高频电路的基本部件。也是学习高频电路的重要基础。第二章讲述单谐振回路，着重讨论谐振特性，主要是幅频特

性，同时也酌量增加相频特性的分析，引入群时延的概念，以适应研究数字信号传输的要求。对于并联回路阻抗变换的几种耦合连接方式作了整理和比较。给出了一些常用简化公式的误差量级。在分析方法上，我们从高 Q 元件串、并联等效电路的变换入手，使分析和计算简化，突出了物理概念。第三章讨论耦合谐振回路，主要分析双调谐回路的谐振曲线，而阻抗匹配和调谐方式则不是重点。电路形式以电容耦合为主。

第四、五章讨论小信号高频放大电路。小信号调谐放大器常常被看做是学习高频电路的入门。因此，第四章中首先以较多的篇幅介绍晶体管工作于高频时的特点和分析方法，着重讨论混合 π 型等效电路和 y 参量等效电路。然后对几种典型的高频放大器（单调谐、双调谐和参差调谐）进行分析，并给出一些计算的实例。

近年来，由宽带放大器和集中滤波器构成的“宽带中放”的应用日益广泛。为了适应这方面的发展，编写了“宽频带中频放大器”这一章，讨论宽带放大器（包括分立电路和集成电路）的原理和典型电路，并扼要介绍 LC 带通滤波器的设计方法，和一种正在蓬勃发展的新型滤波器——声表面波滤波器的原理和应用。

随着新器件的研制和新技术的发展，在高频电路中除广泛应用非线性元件以外，参变元件，如变容二极管等也已在电路中大量应用。在第六章，我们扼要介绍线性、非线性和参变电路的基本特点与分析方法，推证了门雷—罗威关系式，为后面各章分析非线性电路和参变电路打下基础。

第七章讨论高频功率放大与倍频。着重功率放大器工作状态的计算，讨论了采用阻抗匹配网络作为输入、输出和级间耦合电路的设计方法，此外，还讨论了宽频带功率放大器的基本工作原理。在倍频技术方面，同时讨论了晶体三极管倍频器和变容二极管参量倍频电路，后者在目前高频电路技术中日益获得广泛应用。

第八章讨论正弦波自激振荡，在分析平衡稳定条件的基础上，研究几种目前广泛应用的三点式振荡电路与晶体振荡电路。关于振

荡现象方面，只讲述间歇振荡和频率牵引，讨论间歇振荡现象有助于理解振荡建立过程，而频率牵引现象正在受到重视并已有一定应用。为了正确认识自激振荡的物理本质，并适应负阻振荡技术的发展，在最后一节讲负阻振荡，初步建立这一概念。

为了使读者便于根据工作和学习的需要选读有关内容，本书在编排上考虑了各章的独立性。例如第三章、第五章可以跳过不学，而第八章则可提前学习，第六章有关参变电路的几节可移后与第七章有关部分一起学习。

本书第二册将继续讨论调幅检波、调频鉴频、数字信号调制解调、混频、噪声、场效应管高频电路以及自动增益控制、自动频率调节、电调谐与锁相环路等。

从学习低频电路到高频电路的过程中，不但在理论分析上要跨越一些“台阶”，在实验测试方面也需要用到一些较为复杂的量测方法和仪器。为解决后一个问题，在本书中，我们结合一些单元电路的技术指标和主要参数，介绍它们的测试原理、测量方法和典型仪器，同时也酌情讨论高频电路在安装和调试中的一些问题。

为了便于自学，书中每章都有一些例题和习题，全书最后附有部分习题解答。此外，对于一些计算问题给出了计算机程序和计算结果，供有条件利用计算机的读者参考。

本书编写组主要成员有：郑君里、肖华庭、李普成、杨行峻，吴佑寿教授指导并参加了编写。谢宏毅、王华俭、朱义胜等也参加了一些编写工作。

限于水平，书中难免有不妥和错误之处，请批评指正。

清华大学通信教研组

一九七七年十月

目 录

第一章 绪论

1.1 无线电发送设备的工作过程和基本原理	2
1.2 无线电接收设备的工作过程和基本原理	5
1.3 信号及其频谱	8
1.4 调幅信号的频谱	14
1.5 无线电波段的划分	17
1.6 无线电波的传播	19
1.7 干扰与噪声	24
1.8 本书的研究对象和内容	26
习题	28

第二章 单谐振回路..... 31

2.1 引言	31
2.2 谐振回路元件	33
2.3 串联谐振回路	39
2.4 并联谐振回路	46
2.5 谐振回路的幅频特性分析—通频带与选择性	53
2.6 谐振回路的相频特性分析—群时延特性	60
2.7 信号源内阻及负载对谐振回路的影响	64
2.8 并联谐振回路的耦合联接、接入系数	69
2.9 并联谐振回路的典型计算	81
2.10 谐振回路中的能量关系 (Q 值的物理意义)	88
2.11 回路元件参数的测量— Q 表	92
2.12 谐振回路的自由振荡现象	96

习题	102
第三章 耦合回路	107
3.1 引言	107
3.2 矩形系数	109
3.3 电容耦合双回路的谐振曲线	112
3.4 互感耦合双回路	120
3.5 耦合回路的反映阻抗	124
3.6 双谐振回路的典型计算	131
3.7 谐振曲线的测试、扫频仪	137
习题	140
第四章 小信号调谐放大器	143
4.1 引言	143
4.2 晶体管的物理参量和高频等效电路	145
4.3 晶体管的几个频率参数	152
4.4 晶体管的 y 参量等效电路	157
4.5 调谐放大器的最大功率放大倍数和晶体管的最高振荡频率	164
4.6 单调谐放大器	170
4.7 多级单调谐放大器的级联	176
4.8 双调谐放大器	179
4.9 参差调谐放大器	186
4.10 放大器的输入导纳和输出导纳	192
4.11 晶体管内部反馈的有害影响及解决办法	195
4.12 放大器的最大稳定增益	200
4.13 调谐放大器的计算举例	204
习题	208
第五章 宽频带中频放大器	212
5.1 引言	212
5.2 共基极宽频带放大器	213

5.3	负反馈对管宽带放大器	223
5.4	负反馈对管放大器的计算	234
5.5	集成化放大器	238
5.6	LC带通滤波器	243
5.7	声表面波滤波器	257
5.8	中频放大器的结构	269
5.9	中放阻抗的测量和调整	274
	习题	279
第六章	非线性电路与参变电路分析引论	281
6.1	引言	281
6.2	线性元件与非线性元件	282
6.3	非线性特性的幂级数表示法	285
6.4	非线性特性的幂级数分析法	288
6.5	两个正弦信号作用在非线性电路	292
6.6	非线性特性的折线表示法和非线性电路的折线分析 法	295
6.7	变容二极管的基本特性	299
6.8	变容二极管电路的分析方法	303
6.9	参变电路的初步概念、门雷——罗威关系式	312
6.10	小结	321
	习题	323
第七章	高频功率放大与倍频	326
7.1	引言	326
7.2	功率谐振放大器的工作原理与能量关系	330
7.3	功率晶体管的高频效应与安全工作区	350
7.4	功率谐振放大器工作状态的计算与调整	364
7.5	高频功率放大器电路参数计算	378
7.6	宽频带高频功率放大器	403
7.7	功率的合成与分配	423

7.8	倍频器	442
7.9	高频功率的测量	456
	习题	459
第八章	正弦波自激振荡	461
8.1	引言	461
8.2	反馈型正弦波自激振荡器基本原理	462
8.3	自激振荡的平衡条件、起振条件和稳定条件	469
8.4	三点式LC振荡器——三点线路	476
8.5	改进型电容反馈三点线路	488
8.6	振荡器的频率稳定	498
8.7	石英(晶体)谐振器	504
8.8	石英晶体振荡器电路	513
8.9	振荡器的幅度稳定	524
8.10	振荡器电路和参数的选择	527
8.11	振荡器的调整与测量	530
8.12	间歇振荡与频率牵引	540
8.13	RC振荡器	548
8.14	负阻振荡器	558
	习题	568
附录一	部分习题答案	575
附录二	部分计算问题的计算机程序与数值结果(用“130”机 “BASIC”语言)	583
附录三	最大平坦型和等波纹型低通原型滤波器的归一化衰减 特性	597
附录四	最大平坦型和等波纹型滤波器的归一化元件表	600

第一章 绪 论

近百年来，在自然科学方面有很多重大的发现和发明，无线电是这些发明中极其重要的一种。它从诞生到现在的八十多年中，对人类的生活和生产活动起着非常深刻的作用和影响。

无线电技术最早应用在通信方面。随着科学技术的不断发展，它的应用范围迅速扩大。现在所说的无线电通信，已远远超出一般通信的领域，而扩展为各种性质的消息的传递，并成为各种科学技术以及工农业生产的重要工具。

传输信息的系统，统称为通信系统。在无线电电子学这门学科中，通信系统是其中的一个重要的分支，它的工作原理和工作过程也具有普遍的、典型的意义。因此，在这本书中，我们将以通信系统为主要对象，阐述无线电技术的一些问题。

一个完整的通信系统应包括信号源、发送设备、传输信道、接收设备和受信装置五部分，如方框图1—1所示。传输信道的种类视具体情况而定，它可以是平行线（如架空明线等）、电缆、或光缆，也可以是传输无线电波的自由空间。

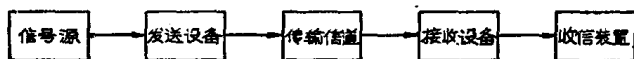


图 1—1 通信系统方框图

本书介绍无线电发送设备和接收设备的工作原理和组成，着重讨论构成发送、接收设备的各种单元电路的工作原理、典型线路和分析方法。在具体介绍这些单元电路之前，先扼要介绍无线电广播的原理，说明无线电信号的发送和接收过程，以及收、发设备的组成，使读者对无线电通信系统有一全面的认识，对各组成部分之间的有机联系有所了解。

1.1 无线电发送设备的工作过程和基本原理

所谓无线电广播是指把声音或图象，以“无线电”为手段传送给远方的听众（或观众）的意思。

现在的问题是，无线电是怎样把声音或图象信号传送出去呢？

我们知道：人耳能听到的声音的频率约在20赫到20千赫的范围内，通常把这一频率范围叫做音频。声波在空气中传播的速度很

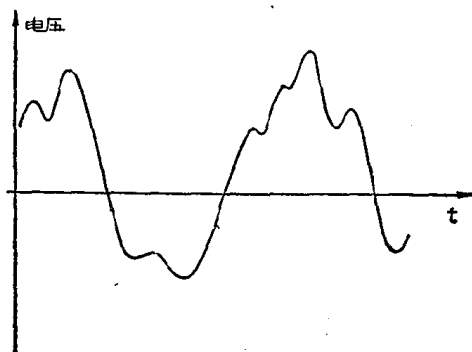


图 1—2 声音信号的波形

慢，约340米/秒，而且衰减很快。一个人无论怎样尽力高喊，他的声音也不会传得很远。为了把声音传送到远方，常用的方法是将它变成电信号，再设法把信号播送出去。将声音变为电信号的任務一般由话筒（也叫微音器）来承担。当播音员对着话筒

说话时，话筒就输出相应的电压，这个电压的变化规律与声音的变化规律相同，如图1—2所示。

从话筒得到的电信号的强度一般都很小，通常只有几毫伏至零点几伏，需要用音频放大器加以放大。经过放大后的音频信号可以利用导线传送出去，再经喇叭恢复为原来的声音。这就是通常的有线广播。

怎样才能不用导线，将声音的信号由天空传播出去呢？

我们知道，交变的电振荡可以利用天线向空中辐射出去。但是天线的尺寸必须足够长，这种无线电辐射才有效。具体地说，天线长度必须和电振荡的波长可以比拟，才能有效地把电振荡辐射出去。前面讲过，声音信号的频率约为20至20000赫，即其波长范围

是 15×10^3 至 15×10^6 米，要制造出与此尺寸相当的天线显然是很困难的。因此直接将音频信号辐射到空中去很不容易，而且即使辐射出去，各个电台所发出的信号频率都相同，它们在空中混在一起，收听者也无法选择所要接收的信号。因此要想不用导线传播声音信号，就必须利用频率更高（即波长较短）的电振荡，并设法把音频信号“装载”在这种高频振荡之中，然后由天线辐射出去。这样，天线尺寸可以比较小，不同的广播电台也可以采用不同的高频振荡频率，使彼此互不干扰。

无线电广播台中产生高频电振荡的部件叫“高频振荡器”，把音频信号“装到”（控制）高频振荡的过程叫做调制，经过调制以后的高频振荡叫做“已调信号”。利用传输线把已调信号送到天线，就可以把它辐射出去，传送到远方。

综合上面的分析，归纳起来，一个广播发射机应包括四个组成部分：一是声音的变换与放大，这一部分的频率较低，叫做“低频部分”；二是高频振荡的产生、放大与调制，统称“高频部分”；三是天线与传输线；四是直流电源部分。

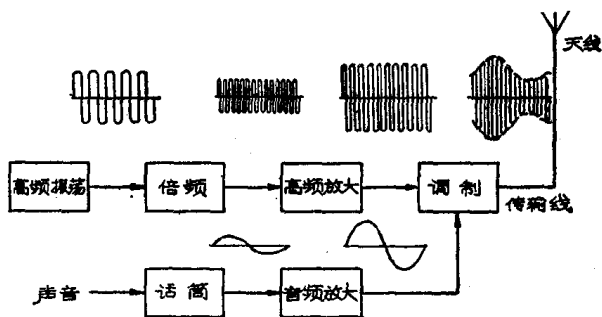


图 1—3 广播发射机的方框图

图1—3画出发射机的方框图，直流电源部分在图中没有画出。

下面介绍发射机高频部分的工作原理，着重说明调制的作用和方法。

图1—3中，高频振荡器的作用是产生高频振荡。目前广播用的高频振荡都是正弦波。这种高频电波是用来运载声音信号的，我们就把它叫做载波。它的频率叫做载频。例如中央人民广播电台的一

个频率是640千赫，波长约469米。在广播发射机中，高频振荡器所产生的电振荡的频率不一定恰好等于所需要的载波频率，可能是后者的若干分之一；它的电压一般也比较小。需要用倍频器把频率提高到所需要的数值，再用高频放大器放大到一定的强度。图1—3中的波形图清楚地表明了这种倍频和放大的作用。

现在来讲讲调制的作用。

我们知道，一个高频正弦振荡可以表示为：

$$u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1-1)$$

其波形画在图1—4(a)。\$u_c\$是高频正弦振荡的瞬时值，\$U_c\$是它的振幅，\$\omega_c\$是角频率，\$\varphi_c\$是初始相角。

为了说明问题方便起见，先假定音频信号也是一个正弦波，它的表示式是（图1—4 b）：

$$u_a(t) = U_a \cos \Omega t \quad (1-2)$$

这里\$U_a\$是正弦音频信号的振幅，\$\Omega\$是音频角频率。照理，它也应有一个初始相角\$\varphi_a\$，这里暂时假设\$\varphi_a = 0\$。

将音频信号“装载”到高频振荡中去的方法有好几种。广播电台中常用的方法是所谓调幅。这种方法是：令高频振荡的振幅随音频信号而变化。说详细一点，当音频信号的瞬时值\$u_a = 0\$时，高频振荡的振幅保持为原来的数值\$U_c\$；当\$u_a\$增大时，高频振幅也增大；而当\$u_a\$减小时，高频振幅也减小。这样，高频振荡的振幅可以写成

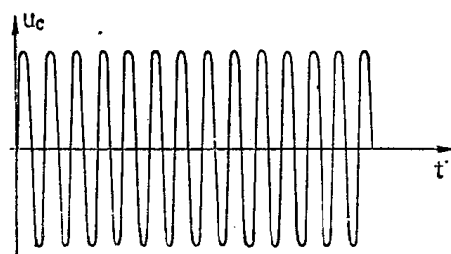
$$U_c(1 + m \cos \Omega t)$$

相应的高频电振荡叫做“调幅波”，其波形如图1—4(c)所示。它的表示式是：

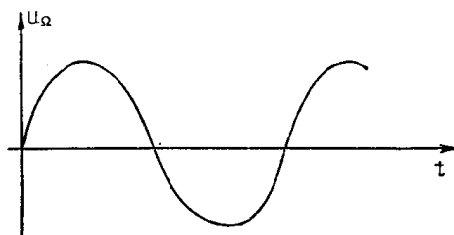
$$u(t) = U_c(1 + m \cos \Omega t) \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1-3)$$

\$m\$是一小于1的常数，叫做“调幅系数”。它应该和音频信号的\$U_a\$成正比，调幅信号才没有失真。

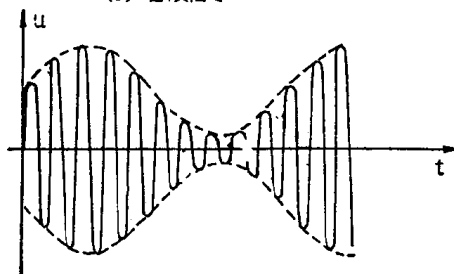
以后我们可以看到，调幅后的信号，已经不是原来的音频信号，也不是单纯的载频振荡，而是包含若干个频率分量的高频电振



(a) 载波信号



(b) 音频信号



(c) 调幅信号

图 1—4 调幅波形图

荡。因此，把声音信号对高频载波进行调幅以后，利用实际上可以做得到的、尺寸较小的天线，就可以把它从空中辐射出去，传送给远方的听众。这就是无线电广播发射信号的基本过程。

顺便说一下，把音频信号“装载”到高频振荡中去的方法还可以用调频和调相。所谓调频是指高频振荡的角频率 ω_c 随音频信号瞬时值 u_Ω 的变化而变化；所谓调相则是指初始相角 φ_c 随 u_Ω 的变化而变化。这些方法在无线电技术中也广泛应用，以后还要详细讨论。

我国目前中短波段语音广播大都采用调幅制；电视广播中图象部分采用调幅制，伴音部分则采用调频制；大多数雷达信号是调幅信号；通信系统

大都采用调幅和调频，但是在数字通信中，调相制具有一些优点，是近年来迅速发展的一种调制方式。

1.2 无线电接收设备的工作过程和基本原理

现在来讨论无线电接收机的工作原理。最简单的接收机的构造可以用图1—5的方框图来表示。

接收机的工作过程恰好和发射机相反，它的基本任务是将天空

中传来的电磁波接收下来，并把它复原成为原来的信号。

接收从空中传来的电磁波的任务是由接收天线来完成的。这里

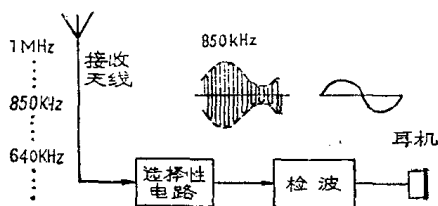


图 1—5 简单接收机的方框图

必须注意的是：由于广播电台很多，在同一时间内，接收天线所收到的将不仅是我们希望收听的电台的信号，而是包含若干个来自不同电台的、具有不同载频的无线电信号。这些广播电台之所以

采用各种不同的载频，其目的就是让听众按照电台频率的不同，设法选择出所需要的节目。因此在接收天线之后，应该有一个选择性电路。它的作用就是把所要接收的无线电信号挑选出来，并把不要的信号滤掉，以免产生干扰。选择性电路是由振荡线圈 L 和电容器 C 组成的。这种 LC 电路通常叫做振荡回路，也叫谐振回路。收听广播时，我们总是要调节接收机里的可变电容器，其作用就是使振荡回路调谐到我们要收听的电台的频率，例如图1—5中，设被收听的电台频率是850千赫，选择电路的谐振频率就必须和它对准。 LC 谐振回路的问题将在第二章和第三章中详细介绍。

选择性电路的输出就是某个电台的高频调幅波。利用它直接去推动耳机（收信装置）是不成的，还必须先把它恢复成原来的音频信号。这种从高频调幅波中检取出音频信号的过程叫做检波（也叫做解调），相应的部件叫做检波器或解调器。把检波器获得的音频信号送到耳机，就可以收听到所需要的广播节目。

上面所讲的只是接收机的最基本的工作过程。这种最简单的接收机叫做直接检波式接收机。实际上的接收机比较复杂。这是因为：第一、从接收天线得到的高频无线电信号通常非常微弱，一般只有几十微伏至几毫伏，直接把它送到检波器进行检波不太合适，最好在选择性电路和检波器之间插入一个高频放大器，把高频调幅信号加以放大。通常，送到检波器的高频调幅信号的电压约需几百毫伏，因此高频放大器的电压放大倍数大约需要有几百倍至几万

倍。第二、即使接收机已经增加了高频放大器，检波器输出的音频信号通常也只有几百毫伏，用耳机收听是足够了，推动功率大一点的扬声器就嫌太小。因此接收机大都需要有音频放大器，把检波器的输出信号加以放大，再推动扬声器。这种带有高频放大器的接收机叫做高放式接收机，它的灵敏度较高，输出功率也较大。但也有不少缺点，主要是选择性还不好、调谐也比较复杂。这是因为，要把天线来的高频信号放大到几百毫伏，一般需要用几级高频放大器，而每一级高频放大器大都需要有一个由 LC 组成的谐振回路。当被接收信号的频率改变时，整个接收机的所有 LC 谐振回路都需要重新调谐，很不方便。为了克服这种缺点，现在的接收机几乎都采用超外差式的线路。图1—6画出了典型的超外差接收机的方框图。

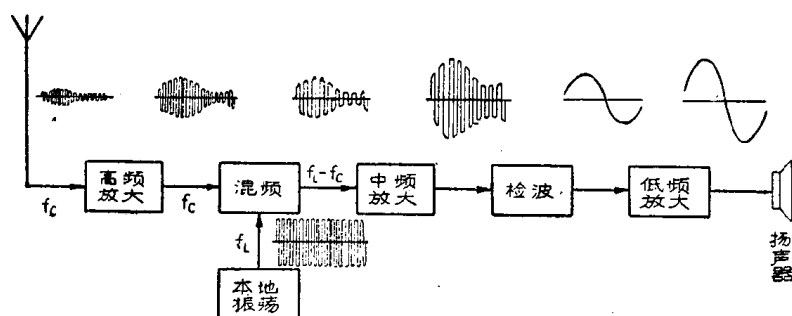


图 1—6 超外差收音机方框图

超外差接收机的主要特点是：把被接收的高频调幅信号的载波频率 f_c 先变为频率较低的而且是固定不变的中间频率 f_i （叫做中频），再利用中频放大器加以放大，然后进行检波。

把高频信号的载波降低为中频的任务是由混频器来完成的。在第十章介绍混频器时，我们将证明：把一个载频 f_c 的调幅波和一个频率为 f_L 的正弦波同时加到混频器上，经过变频以后所得到的仍是一个调幅波，不过它的“载波”频率已经不是原来的载频 f_c ，而是这两个频率之差，即等于 $(f_L - f_c)$ 。通常这个新的“载波”频率比原来的载频低，但比音频信号的频率高，习惯上就把它叫做中