

21 世纪

高级应用型人才



中国高等职业技术教育研究会推荐
高职高专系列规划教材

高频电路分析与实践

主编 钟 苏 刘守义



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

□ 中国高等职业技术教育研究会推荐

高职高专系列规划教材

高频电路分析与实践

主编 钟 苏 刘守义

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

全书共两篇,分为11章。第一篇为高频电路实验与分析,内容包括直接检波接收机:LC选频与检波电路;简单高放式接收机:高放电路;超外差式接收机:变频与AGC电路;调频接收机:鉴频与AFC电路;发射机电路。第二篇为高频电路的基本理论及其应用,内容包括高频小信号放大电路分析基础;高频功率放大电路;正弦波振荡器;调幅、检波与混频;频谱线性搬移电路;角度调制与解调;非线性频率变换电路;反馈控制电路。

本书可作为高职高专电子、通信类专业或相近专业的教材,也可供有关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电路分析与实践/钟苏,刘守义主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2012.8

高职高专系列规划教材

ISBN 978-7-5606-2845-5

I. ①高… II. ①钟… ②刘… III. ①高频—电子电路—高等职业教育—教材 IV. ①TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 146932 号

策 划 马乐惠

责任编辑 王 瑛 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 16

字 数 373千字

印 数 1~3000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-2845-5/TN·0662

XDUP 3137001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

从 1995 年开始,深圳职业技术学院电子与通信系结合专业建设与课程教学改革的需要,对电子技术的几门专业基础课程进行了比较深入的研究与改革,研究成果获广东省教学成果一等奖。课题提出了以能力为主线进行课程宏观设计与微观设计的思路,按照这一思路,编者编写出版了《高频电子技术》、《数字电子技术》、《模拟电子技术》、《单片机技术》、《电子技术操作基础》等系列高职教材,这些教材及与之配套的实训装置为许多高职院校采用。这些教材对巩固与推广教学改革成果,进一步深化与推进教学改革起到了积极作用。

其中《高频电子技术》1999 年出版后,当年即被教育部评为高职高专推荐教材,该教材重印 9 次,发行量达数万册。在原有教材的基础上,2007 年我们对这本教材进行了修改并增补部分章节由西安电子科技大学出版社重新出版。为避免因出版时间太早给高职院校继续选用该书带来困难,同时也为了适应新技术、新器件发展的需要,我们在 2007 年版《高频电子技术》的基础上重新编写了本书(《高频电路分析与实践》)。本书保留了原教材的结构,但在内容上做了大量的更新,主要体现在各章增补了集成器件及其应用方面的内容;重写了第 11 章,强调了集成锁相环的应用;对第一篇高频电路实验与分析的内容也进行了增补,使其在教学中更为适用。

一、本书特点

高频电路是通信与电子信息类专业重要的技术基础课,是一门理论性、工程性和实践性很强的课程。为使学生在理论和实践两方面都有所收获,本书在内容的选取和叙述体系方面,力求体现高职教育教学的特点。

本书内容体系按照人们的认识规律来组织,即通过实际应用系统问题来引导,而不是靠理论体系的逻辑引导。全书分为两篇:

第一篇为高频电路实验与分析。该篇的教学目的是使学生在高频电路的基本技能方面得到系统的训练,增加学生对高频电路的感性认识,体会电路的作用与相关概念的实际含义。全篇安排了 13 个实验项目,通过对无线电通信系统由小到大、由简到繁的安装、调试与检测,以及对实验过程与结果的定性分析,使学生对系统引出的基本单元电路的作用、特点、技术指标等有一个定性的了解,能基本理解电路的工作原理,并对高频电路系统形成一个总体的认识。需要说明的是,我们在这里有意采用了分离元件来构成实验电路,目的是让学生通过这一系列的实验获得高频电路调试、检测方面的有益经验。

第二篇为高频电路的基本理论及其应用。在这一篇中,通过建立单元电路的数学模型来阐述高频电路的基本理论。该篇注重结论的物理意义,尽量避免冗长的数学推导;注重介绍实际电路当前发展的水平及在不同系统中的最新应用。通过这部分的学习,可使学生在新的高度上加深对高频电路系统的总体认识。

二、教学安排

本书第一篇涉及的 13 个实验项目,应尽量创造条件完成,使学生在高频电路实际动手

能力方面得到系统的训练。由于设备、器材等方面的原因不能完成书中全部实验的，可以用演示的方法完成或者借助仿真软件通过模拟实验的方式完成。建议第一篇安排 30 学时~40 学时，第二篇安排 40 学时~50 学时。第二篇可以在完成第一篇后再进行，也可以与第一篇穿插进行。

由于编者水平所限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2012 年 3 月

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 高频电路实验与分析

第一章 直接检波接收机：LC 选频与检波电路	7
1.1 直接检波接收机电路	7
实验一 直接检波接收机的安装与试听	7
1.2 调幅信号与检波电路	8
实验二 调幅波的观察与检波电路的认识	9
1.3 LC 选频电路	12
实验三 LC 谐振电路的认识	12
1.4 直接检波接收机的基本工作原理	14
本章小结	14
习题一	15
第二章 简单高放式接收机：高放电路	16
2.1 简单直接高放式接收机电路	16
实验四(1) 简单高放式收音机的安装与调试	17
2.2 高频小功率放大电路	18
实验四(2) 高频小功率放大电路的认识	18
2.3 直接高放式接收机的基本工作原理	21
本章小结	21
习题二	22
第三章 超外差式接收机：变频与 AGC 电路	23
3.1 超外差式接收机电路	23
实验五 超外差式接收机的安装与调试	24
3.2 变频电路和中频放大电路	25
实验六 变频与中频放大电路的认识	25
3.3 自动增益控制电路	29
实验七 认识 AGC 电路	29
3.4 超外差式接收机的基本工作原理	31
本章小结	32
习题三	32
第四章 调频接收机：鉴频与 AFC 电路	33
4.1 调频波的认识	33

实验八 调幅波与调频波的比较	33
4.2 调频接收机的电路结构与特点	34
4.3 鉴频电路与 AFC 电路	35
实验九 鉴频电路的认识	36
本章小结	40
习题四	41

第五章 发射机电路	42
5.1 发射机的整体认识	42
实验十 高频信号的发射与接收	42
5.2 无线发射机的一些背景知识	45
5.3 调频电路	47
实验十一 调频电路的安装与检测	47
5.4 调幅电路	51
实验十二 调幅电路的安装与测试	52
5.5 高频功率放大电路	54
实验十三 功放电路的安装与调试	54
本章小结	59
习题五	59

第二篇 高频电路的基本理论及其应用

第六章 高频小信号放大电路分析基础	63
6.1 概述	63
6.2 选频器	65
6.2.1 LC 回路的选频特性	65
6.2.2 LC 回路的阻抗变换	67
6.2.3 固体滤波器的选频特性	70
6.3 放大器	72
6.3.1 双口网络的 Y 参数方程组	73
6.3.2 Y 参数的物理意义	73
6.3.3 分析放大电路的一般方法	74
6.4 选频放大电路	76
6.4.1 单调谐放大电路	76
6.4.2 参差调谐放大电路	80
6.4.3 双调谐放大电路	82
6.4.4 集中选频放大电路	85
6.4.5 放大电路的稳定性	86
6.5 高频宽带集成放大器	87
本章小结	88
习题六	89

第七章 高频功率放大电路	91
7.1 概述	91
7.2 丙类高频功率放大器的工作原理	92
7.2.1 基本原理	92
7.2.2 功率关系	94
7.2.3 效率	95
7.2.4 电压利用系数	96
7.2.5 集电极电流的波形系数	97
7.3 高频功率放大器的特性分析	101
7.3.1 谐振负载的影响——负载特性	102
7.3.2 各极电压对工作状态的影响	106
7.4 高频功率晶体管的特性	108
7.5 高频功率放大器的电路结构	110
7.5.1 馈电电路	110
7.5.2 阻抗变换电路	112
7.5.3 高频功放部分印刷电路板的设计	116
7.5.4 高频功率放大器实例	117
7.6 功放管的安全工作	118
7.7 集成高频功率放大电路简介	119
本章小结	121
习题七	122
第八章 正弦波振荡器	124
8.1 反馈型振荡器的工作原理	124
8.1.1 起振过程与起振条件	124
8.1.2 平衡条件	125
8.1.3 稳定条件	126
8.2 LC 正弦波振荡器	126
8.2.1 三点式振荡器的电路组成法则	127
8.2.2 电容三点式振荡电路	127
8.2.3 电感三点式振荡电路	128
8.2.4 改进型电容三点式振荡电路	129
8.3 晶体振荡器	131
8.3.1 石英晶体的特性	131
8.3.2 晶体振荡电路	132
8.3.3 单片集成晶体振荡器	134
8.3.4 运放振荡器	135
本章小结	136
习题八	137
第九章 调幅、检波与混频：频谱线性搬移电路	139
9.1 概述	139

9.2 频率变换电路分析基础	139
9.2.1 非线性元件的特性描述	139
9.2.2 非线性电路的幂级数分析法	142
9.2.3 非线性电路的频率变换作用	145
9.3 相乘器及频率变换作用	149
9.3.1 二极管平衡相乘器	149
9.3.2 四象限模拟相乘器	154
9.4 幅度调制	157
9.4.1 普通调幅信号分析	157
9.4.2 双边带调幅信号分析	161
9.4.3 单边带调幅信号分析及实现模型	164
9.5 调幅电路分析	166
9.5.1 高电平调幅电路	167
9.5.2 低电平调幅电路	168
9.6 幅度解调	170
9.6.1 概述	170
9.6.2 包络检波电路	171
9.6.3 同步检波电路	175
9.7 混频器	179
9.7.1 概述	179
9.7.2 混频电路	181
9.7.3 变频干扰	185
9.8 单片集成调幅收音机	187
本章小结	188
习题九	189
 第十章 角度调制与解调：非线性频率变换电路	 193
10.1 概述	193
10.2 角度调制原理	193
10.3 调频电路	197
10.3.1 直接调频电路	197
10.3.2 间接调频电路	201
10.4 调频波的解调	202
10.4.1 鉴频的方法和鉴频器的主要技术指标	202
10.4.2 常用鉴频电路	204
10.5 调频制的抗干扰(噪声)性能	212
10.6 单片集成调频发射机与接收机实例	214
10.6.1 单片集成调频发射芯片 MC2833	214
10.6.2 单片窄带集成调频接收芯片 MC13136	216
本章小结	218
习题十	219

第十一章 反馈控制电路	221
11.1 概述	221
11.2 AGC 电路	222
11.2.1 AGC 电路的功能	222
11.2.2 放大器输出电平测量	223
11.2.3 AGC 电路增益调整元件	224
11.3 APC 电路	226
11.4 AFC 电路	227
11.4.1 AFC 电路的工作原理	227
11.4.2 AFC 电路的应用	228
11.5 锁相环路(PLL)	229
11.5.1 锁相环路的工作原理	230
11.5.2 集成锁相环	231
11.5.3 锁相环路的应用	233
本章小结	243
习题十一	243
参考文献	245

绪 论

一个多世纪以来,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。它从诞生到现在的一个多世纪中,对人类的生活和社会的进步产生了深刻的影响并起着重要作用。

在早期,无线电技术的发展和无线电通信的发展几乎是密不可分的。一个无线电收发系统所包含的电子线路,涉及到电子线路的主要类型,它的工作原理和工作过程也具有普遍的、典型的意义,而且通信技术的发展和现代化,充分反映了无线电技术的发展。因此,在本书中,我们将以无线通信系统中的发送设备和接收设备为线索,讨论高频电子线路所涉及的一些问题。

一、通信系统的组成

广义地说,凡是在发信者和受信者之间,以任何方式进行消息的传递,都可称为通信。实现消息传递所需的设备的总和,称为通信系统。19 世纪末迅速发展起来的以电信号作为消息载体的通信系统,称为现代通信系统或电信系统,其组成方框图如图 0-1 所示。其中,各部分的作用简介如下。



图 0-1 现代通信系统组成方框图

1. 换能器

信源是指需要传送的原始信息,如声音、图像、文字等,一般是非电物理量。输入换能器的任务是将信源提供的非电量信息变换为电信号,这种电信号通常称为基带信号。基带信号的特点是频率较低,相对带宽较宽,如话音信号带宽为 300 Hz~3400 Hz,电视信号带宽为 0 MHz~6 MHz。输出换能器的作用则与之相反,是将接收设备输出的基带信号还原成原始信息。

2. 发送设备

发送设备的主要任务是调制和放大。在通信系统中,大多数信道不适宜直接传输基带信号。因此,必须将基带信号变换成适合信道传输的频带信号,这个过程称为调制。

调制就是用待传输的基带信号去控制信息载体高频电振荡的某一参数,让这一参数随基带信号线性变化的过程。例如,在连续波调制中,用基带信号去控制高频振荡的振幅,称为振幅调制,简称调幅(AM);用基带信号去控制高频振荡的频率,则称为频率调制,简称调频(FM);用基带信号去控制高频振荡的相位,则称为相位调制,简称调相(PM)。通常将基带信号称为调制信号,经过调制后的高频振荡信号带有基带信号的信息,称为已调

信号；而未被调制的高频振荡是运载信息的工具，称为载波信号。

放大是指对调制信号和已调信号的电压和功率进行放大、滤波等处理过程，以保证已调波有足够的功率送入信道。

3. 信道

信道是信号传输的通道，又称传输媒介。通信系统中应用信道可分为两大类：有线信道（如架空明线、电缆、波导、光纤等）和无线信道（如海水、地球表面、自由空间等）。不同信道有不同的传输特性，同一信道对不同频率信号的传输特性是不同的。例如，在自由空间媒介里，电磁能量是以电磁波的形式传播的，而不同频率的电磁波却有着不同的传播方式。电磁波具有直射、绕射、反射、折射等现象。例如，1.5 MHz 以下的电磁波可以绕着地球的弯曲表面传播，称为地波。由于大地不是理想导体，当电磁波沿其上传播时，有一部分能量被损耗掉，并且频率越高，损耗越严重，因此频率较高的电磁波不宜采用绕射方式传播。另外还应指出，由于地面的电性能在较短时间内变化不会很大，因此这种传播比较稳定。1.5 MHz~30 MHz 的电磁波主要靠天空中电离层的折射和反射传播，称为天波。电离层是由太阳和星际空间的辐射引起大气上层电离形成的。电磁波到达电离层后，一部分能量被吸收，一部分能量被反射和折射到地面。频率越高，被吸收的能量越小，电磁波穿入电离层也越深。当频率超过一定值后，电磁波就会穿透电离层传播到宇宙空间而不再返回地面，因此频率更高的电磁波不宜用天波传播。30 MHz 以上的电磁波主要沿空间直线传播，称为空间波。由于地球表面的弯曲，空间波传播的距离受限于视距范围。架设发射天线、利用通信卫星可以增大其传输距离。

为了讨论问题的方便，将不同频率的电磁波人为地划分为若干个频段或波段，其相应名称和应用举例列于表 0-1 中。人们常对微波波段做更详细的划分，并用不同的拉丁字母表示，如表 0-2 所示。应该指出，各波段的划分是相对的，因为各波段之间并没有显著的分界线，但各个不同波段的特点仍然有明显的差别。例如，从使用的元器件以及电路结构与工作原理等方面来说，中波、短波和米波段基本相同，但它们和微波波段则有明显的区别。前者大都采用集总参数的元件，如通常的电阻器、电容器和电感线圈等，在器件方面主要采用一般的晶体二极管、三极管、场效应管和线性组件等。而后者则采用分布参数的元件，如同轴线、光纤和波导等。在器件方面除采用晶体管、场效应管和线性组件外，还需要特殊器件，如调速管、行波管、磁控管及其他固体器件，它们在作用原理上和晶体管也很不一样。

4. 接收设备

接收设备的任务是选频、放大和解调。也就是将信道传输过来的已调信号进行处理，恢复出与发送端相一致的基带信号，这个过程称为解调。显然，解调是调制的逆过程。又由于信道的衰减特性，经远距离传输到达接收端的信号电平是很微弱的（微伏数量级），需要放大后才能解调。同时，信道中还存在许多干扰信号，因而接收设备还必须具有从众多干扰信号中选择有用信号，抑制干扰信号的能力。

二、无线电发送设备和接收设备的组成

发送和接收设备是现代通信系统的核心部件。图 0-2 为无线发射机组成方框图，它包括三个部分：高频部分、低频部分和电源部分。

高频部分通常由主振级、倍频级、调制级和功率放大级组成。主振级的作用是产生频率稳定的高频载波信号。倍频级的作用是将主振产生的高频载波的频率提高到所需的数值。调制器受低频放大级送来的基带信号的控制，产生高频已调信号，经功率放大级进行高频功率放大，获得足够的功率，最后经发射天线将已调波辐射出去。

低频部分的基带信号通过低频放大器放大，为调制器提供完成调制所需的调制信号。

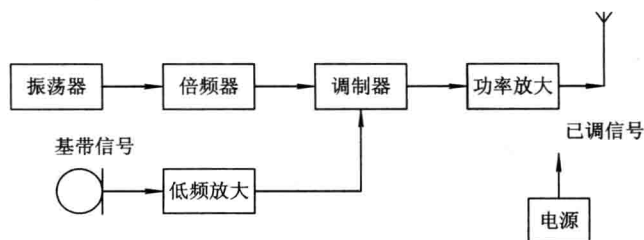


图 0-2 无线发射机组成方框图

无线电信号的接收过程正好和发射过程相反。图 0-3 所示为超外差式接收机组成方框图，接收天线将收到的电磁波转变为已调波电流，然后从这些已调波电流中选择出所需的信号并对其进行放大。放大后的有用信号 f_s 送入混频器与本地振荡器产生的正弦振荡信号 f_L 在混频器中混频，产生一个频率固定不变的中频信号 f_i (在后面的有关章节中将证明，该信号保留了输入信号中的全部有用信息)。混频器产生的中频信号经过若干级中频放大后，经解调器解调，还原成基带信号，最后经低频放大输出。

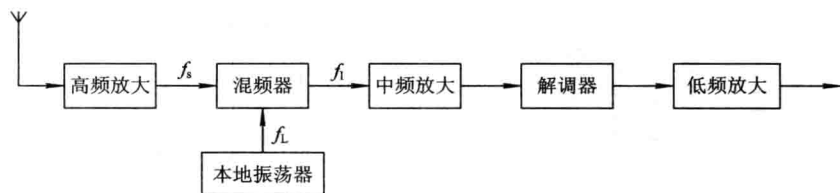


图 0-3 超外差式接收机组成方框图

三、本书研究的对象和内容

通过以上介绍，我们对无线电通信的基本原理有了一个粗浅的了解。下面我们将陆续介绍无线电发送设备和接收设备的工作原理与组成，着重讨论构成发送、接收设备的各单元电路的工作原理、典型电路、性能特点、工程分析方法、测试及调试方法。这些基本单元电路包括高频小信号放大电路、高频功率放大电路、正弦波振荡器、调制和解调电路、倍频电路、混频电路、反馈控制电路等。这些电路除了在现代通信系统中具有举足轻重的作用外，还广泛地应用于其他电子设备中。

需要指出的是，“高频”这一术语从广义来说，就是适于无线电传播的无线电频率，通常又称“射频”。由表 0-1 可知，高频包括的频率范围很宽。本书讨论的内容只限于狭义的“高频”，通常指低于微波频率范围。这是因为在微波波段，使用的有源器件和线路结构都与高频波段很不相同。当然，在本书中讨论的一些高频电路的基本原理，对微波范围也是适用的。

表 0-1 电磁波波段的划分

频率	30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz	3 THz	300 THz
频段名称	极低频 (ELF)	声频 (VF)	甚低频 (VLF)	低频 (LF)	中频 (MF)	高频 (HF)	甚高频 (VHF)	特高频 (UHF)	超高频 (SHF)	极高频 (EHF)	超极高频 (SEHF)		
应用举例	音频 电话 数据传输 长距离航海时间标准	航海设备 无线电信标		短波广播 移动通信 军用通信 业余无线电	电视 调频广播 空中交通管制 业务无线电	电视 遥测 雷达 业余无线电	雷达 卫星通信 业余无线电	无线电天文学 雷达 着陆设备 业余无线电	卫星广播 与通信	光通信 数据传输			
		长波 (LW)	中波 (MW)	短波 (SW)	米波 超短波	分米波	厘米波	毫米波	亚毫米波	光波			
波长	10 Mm	1 Mm	100 km	1 km	100 m	10 m	1 m	10 cm	1 cm	100 μm	1 μm		
传输媒介	架空明线、视频电缆												
	有线	射频电缆											
	无线	自由空间											

表 0-2 微波波段的划分

波段代号	L	S	C	X	Ku	k	ka	Q~W
简称	22 cm 波段	10 cm 波段	5 cm 波段	3 cm 波段	2 cm 波段	1.25 cm 波段	0.8 cm 波段	0.4 cm 波段
波长范围 /cm	75~15	15~7.5	7.5~3.65	3.65~2.42	2.42~1.66	1.66~1.13	1.13~0.75	0.75~0.375
频率范围 /MHz	400~2000	2000~4000	4000~8200	8200~12 400	12 400~18 000	18 000~26 500	26 500~40 000	40 000~80 000

第一篇

高频电路实验与分析

电台能将声音、图像、文字与符号通过一定的方式发送出去。收音机、电视机、移动电话等广播与通信设备能接收电台发射的信号，把它还原成声音、图像、文字或符号。信号的发送与接收涉及到无线电技术中的信息传输与信息处理，高频电路讨论的正是用于信息传输和信息处理方面的基本电路。

高频电路包含的基本电路多种多样。不同通信系统传输的信息、选择的信道以及为完成通信设计制作的设备，相互之间有着很大的差异，但基本方法与采用的基本电路却是相通的。本篇通过对直接检波接收机、简单高放式接收机、超外差式接收机、调频接收机、发射机电路等实用电路由浅入深、由简到繁的实验与分析，使读者对高频电路中所涉及到的基本电路形成一个整体的定性的认识。

第一章 直接检波接收机：LC 选频与检波电路

本章通过安装一台最原始的直接检波接收机，并通过对接收机中选频与检波电路的实验与分析开始高频电路的学习。

本章中，技能方面涉及的主要内容有简单电路的安装与调试，有源音箱、示波器、高频信号发生器、扫频仪等高频实验室常规仪器的使用；理论方面涉及的主要内容有调幅信号的定性分析，检波二极管的作用及检波的物理过程，选频电路的作用与特点，直接检波接收机的工作原理等。

1.1 直接检波接收机电路

在绪论中，我们已经对通信系统的组成有了一个大概的了解。大家都知道，接收设备是完成通信工作的重要一环。绪论给出了接收机的结构方框图。其实，早期的接收机电路远没有这么复杂。

将一个由可变电容与磁性天线构成的谐振回路、一个二极管、一个电容器与一个耳机按图 1-1 连接起来就可以接收从电台发射出来的广播信号。在这个电路中，没有任何放大环节，因此不需要电源，人们称之为直接检波接收机。我们可以通过下面的实验来认识这种简单的接收机。

实验一

直接检波接收机的安装与试听

一、实验步骤

步骤 1：电路连接

首先在一块面包板或万能板上按图 1-1 将电路连接起来，为了获得较大的音量，可以用一个有源音箱来代替耳机。

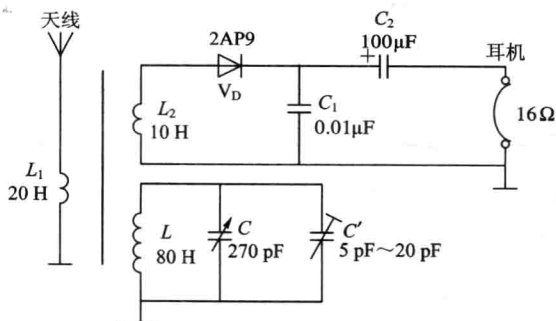


图 1-1 直接检波接收机