
前 言

南京润众科技有限公司是专业从事通信工程与电子信息专业实验教学设备研发、生产、销售和技术服务的高新技术企业。公司坐落在著名的历史文化名城—中国南京市，枕紫金、挽玄武，踞光华门之宝地、映秦淮河之碧波，依托地区教育，信息，产业优势，经过润众人不懈的努力，公司已经发展成为国内知名的通信教育综合服务厂商。

公司主要研制生产数字电路与 EDA 系列、高频电子系列、信号系统与信号处理系列、通信原理系列、现代交换系列、光纤通信系统、SDH 光传输与 EPON 光接入系统、移动通信系列、无线通信系列、电磁场电磁波与天线系列、微波与射频通信系列、软件无线电系列、电子通信创新设计开发系列、RZ-NGN 通信网络综合实训系统、NGN 软交换实训系统、基于 4G 的移动互联网实训系统、物联网、虚拟仪器系列、通信仪表设备、可视通信系统等二十大系列六十多种型号的通信与电子教学设备，品种之多样，型号之齐全，堪称通信电子教仪生产公司之最。

公司紧随新技术发展，及时将先进的信息与网络技术应用用于实验教学，新近研制了“模拟通信演示系统”、“数字通信演示系统”、“远程微处理器应用开发实验平台”、“远程虚拟实体无线通信系统实验平台”等产品，有效地解决了实验场地与学生实验时间冲突的矛盾，实验平台在管理软件和虚拟实体操作软件的支持下，学生能在远端**随时、随地、随兴**完成课程实验，进行设计创新开发；提升了教学效果、激发了学生的学习兴趣，受到专家好评；

专家教授领其衔，栋梁英才集于斯。公司拥有一支由一线资深教授、高级工程师、高级实验师和年轻硕士、博士组成的研发队伍，研发能力强，产品科技含量高。可为各类院校提供个性化服务，量身定做各种适用的通信电子教学实验设备。公司设有专业的焊接生产调试基地，生产设备良好，通过严格的生产调试工艺，保证产品质量稳定可靠。经过公司多年信誉积累，销售及服务网络遍及全国，产品已在超过 200 多所高校投入使用，为各高校的实验教学发挥了重大作用。

润众公司任重道远，公司非常感谢教育界同仁多年来对南京润众科技的关心和大力支持，热忱欢迎广大用户莅临公司参观、考察、指导。我们期待您的到来！

技术支持及联系方式：

电 话：025-84585075

E-Mail：njrzkj@126.com

Http:// www.njrzkj.com

润众教材编写组 2020 年 07 月版

目 录

第 1 部分 实验箱使用基础	1
1.1 实验平台介绍	1
1.2 各实验模块介绍	3
1.3 实验平台操作及注意事项	5
第 2 部分 高频电子预备性实验	11
2.1 中控模块内置仪表使用	11
第 3 部分 高频电子实验	15
实验 1 小信号调谐放大器（单调谐与双调谐放大器）	15
1-1 小信号调谐放大器基本工作原理	15
1-2 小信号调谐放大器实验电路	18
1-3 小信号调谐放大器实验目的、内容和步骤	20
实验 2 正弦波振荡器（LC 振荡器和晶体振荡器）	24
2-1 正弦波振荡器的基本工作原理	24
2-2 正弦波振荡器的实验电路	28
2-3 正弦波振荡器实验目的、内容和步骤	31
实验 3 混频器（晶体三极管混频器和集成乘法器混频器）	33
3-1 混频器的基本工作原理	33
3-2 混频器的实验电路	35
3-3 混频器的实验目的、内容和步骤	39
实验 4 中频放大器	41
4-1 中频放大器的基本工作原理	41
4-2 中频放大器的实验电路	42
4-3 中频放大器的实验目的、内容和步骤	44
实验 5 振幅调制（集成乘法器幅度调制电路）	46
5-1 振荡调制的基本工作原理	46
5-2 振幅调制实验电路	53
5-3 振幅调制实验目的、内容和步骤	55
实验 6 振幅解调器（包络检波、同步检波）	59
6-1 振幅解调基本工作原理	59

6-2 振幅解调实验电路	64
6-3 振幅解调实验目的、内容和步骤	68
实验 7 高频功率放大器	71
7-1 高频功率放大器基本工作原理	71
7-2 高频功率放大器实验电路	75
7-3 高频功率放大器实验目的、内容和步骤	77
实验 8 频率调制（变容二极管调频器）	81
8-1 频率调制工作原理	81
8-2 频率调制实验电路	87
8-3 频率调制实验目的、内容和步骤	90
实验 9 调频波的解调（斜率鉴频与相位鉴频器）	92
9-1 调频波解调工作原理	92
9-2 调频波解调实验电路	95
9-3 调频波解调实验目的、内容和步骤	97
实验 10 自动增益控制（AGC）	99
10-1 自动增益控制基本原理	99
10-2 自动增益控制实验内容和步骤	101
实验 11 调幅发射与接收完整系统的联调	102
11-1 无线电通信概述	102
11-2 调幅发送部分联试实验	105
11-3 调幅接收部分联试实验	106
11-4 调幅发射与接收完整系统的联调	107
实验 12 调频发射与接收完整系统的联调	109

第 1 部分 实验箱使用基础

1.1 实验平台介绍

一、实验平台简介

RZ9653 型高频电子线路实验平台，是为适应当前高频电子理论教学及实验教学的发展趋势，精心研发的新一代高频电子技术实验平台。该平台不仅具备完成常规实验的功能，还结合了当前教学技术发展的几大趋势，即：实验教学的工程化，实验设备的网络化，课堂教学的智能化。

系统具备方便的软硬件升级功能，可以方便地解决高校在购买实验设备后的几年内，进行实验内容的扩展及升级。

实验平台不仅在功能上进行的革命性的改进，在结构上也进行了创新设计，该实验平台在结构上具备以下特点：



图 1-1 实验平台实物图参考

- 采用主控系统+实验模块形式的模块化实验平台，方便扩展，维护升级；

- 实验平台采用一体化开模工艺，结构设计合理，整体协调美观；
- 实验模块通过触点式电源及通信总线，不需接插件，更换方便，性能稳定可靠；
- 每个模块均用翻盖式有机玻璃保护，不用螺丝固定，操作便捷。并且配备专用锁具，可以防止模块随意更换；
- 备用模块等备件可放置实验箱左侧储物盒，储物盒有盖子锁定，方便物件管理；
- 为便于实验测量，所有实验测量孔均为铆孔和测量针相组合的形式进行放置，便于连线和示波器的测量。

二、实验场景设置

在使用该平台进行实验课程展开时，重新定义了实验场景，摆脱了早期实验内容设置单调，仅仅是完成实验连线，然后测量波形的这种模式。在 RZ9653 型实验平台上进行实验时，按照下面流程进行实验：

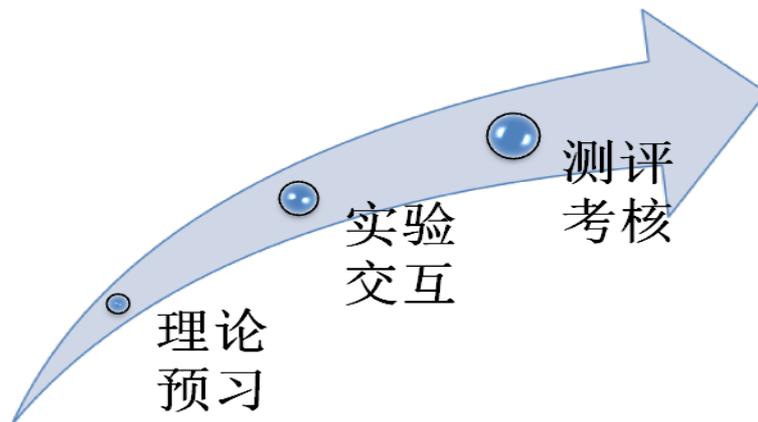


图 1-2 实验教学课堂流程

- **理论预习：**系统自带交互式预习系统，通过实验框图，文字说明，理论波形等内容，结合配套的实验教材，完成对当前课时实验理论的预习。
- **实验交互：**在进行实验时，能在框图界面通过触摸屏调整实验参数，如：输入模拟信号幅度、频率、波形、工作点等；信号处理流程与原理展示清晰。
- **课堂测评：**独创通信电子电路在线考核系统，教师通过手机 APP 软件配置或修改实验系统工作参数，考核学生对通信电子电路中：工作点、谐振回路、负载、增益、振荡条件、信号失真、反馈等知识点理解。

1.2 各实验模块介绍

一、实验模块

RZ9653 型高频电子技术实验平台采用智能中控系统和实验模块结构，形象展示实验原理、操作步骤，有助实验原理解、设备维护和功能升级扩展。配置模块支持高频电子课程的原理实验、系统实验等，模块既能完成对应的实验内容，多模块级联配置后，能构成完整的无线调频或调幅收发信机系统。本节中将对标配的实验模块进行介绍：

系统标配了以下几种实验模块：

- 智能主控系统；
- 无线接收与小信号放大模块-A1；
- 正弦振荡器与晶体管混频模块-A2；
- 高频功放与无线发射模块-A3；
- 变容管调频与相位鉴频-A4；
- 中放 AGC 与二极管检波模块-A5；
- 集成乘法器调幅，混频与同步解调-A6

二、各个实验模块介绍

1. 智能主控系统

中控系统主要实现平台的智能管理与人机交互功能，配备了 ARM 处理器，运行智能操作系统，界面采用 7 寸彩色液晶，扬声器，无线 WIFI 模块等，完成对整个平台的功能管理，如：实验功能选择，模块在位情况监测，模块通断电操作、上位机互联等。

中控系统内置 DDS 低频信号源、DDS 高频信号源、高频频率计、高频扫频仪等。人机交互友好，如下图所示，可选实验项目、低频信号源、高频信号源、频率计、扫频仪、高频故障（考核），子功能操作见下文（1.3）；



图 1-1 主控模块液晶显示

主控模块内置了双路 DDS 信号源（低频和高频），可以生成各种类型的信号。低

频信号如：正弦波，方波，三角波，调幅，调频，双边带，音乐信号等。低频信号频率：100HZ—200KHZ（正弦波）；高频信号：1KHZ-20MHZ，幅度：100MV-1200MVpp；
主控面板旋钮与接口说明如下图：



2. 无线接收与小信号放大模块-A1

组成：单调谐、双调谐电路，完成小信号接收；

3. 正弦振荡器与晶体管混频模块-A2

组成：LC 正荡器电路、晶体振荡器电路、晶体管混频电路；完成本振和混频；

4. 高频功放与无线发射模块-A3

组成：丙类功放电路；完成丙类功放三种条件下过压、欠压、临界状态研究；

5. 变容管调频与相位鉴频-A4

组成：变容管调频电路、电容耦合相位鉴频电路；完成频率调制与解调；

6. 中放 AGC 与二极管检波模块-A5

组成：中放电路、二极管检波电路；完成中频信号放大与调幅信号解调；

7. 集成乘法器调幅，混频与同步解调-A6

组成：乘法器调幅、乘法器混频；同步解调；

1.3 实验平台操作及注意事项

一、实验平台基本操作方法

在使用实验平台进行实验时，要按照标准的规范进行实验操作，一般的实验流程包含以下几个步骤：

- (1) 将实验台面整理干净整洁，设备摆放到对应的位置开始进行实验；
- (2) 打开实验箱箱盖，或取下箱盖放置到合适的位置；（不同的实验箱盖要注意不能混淆）；
- (3) 简单检查实验箱是否有明显的损坏；如有损坏，需告知老师，以便判断是否可以正常实验；
- (4) 根据当前需要进行的实验内容，由老师或自行更换实验模块；更换模块需要专用的钥匙，请妥善保管；
- (5) 为实验箱加电，并开启电源；开启电源过程中，需要注意观察实验箱电源指示灯（每个模块均有电源指示），如果指示灯状态异常，需要关闭电源，检查原因；
- (6) 实验箱开启过程需要大约 20s 时间，开启后可以开始进行实验；
- (7) 实验内容等选择采用触摸操作；
- (8) 在实验过程中，可以打开置物槽，选择对应的配件完成实验；
- (9) 实验完成后，关闭电源，整理实验配件并放置到置物槽中；
- (10) 盖上箱盖，将实验箱还原到位。

二、实验平台系统功能介绍

实验平台系统分为六大功能板块，分别为实验系统、低频信号源、高频信号源、频率计、扫频仪、高频故障（实验测评），见下图。



1. 实验系统

实验系统是指实验箱支持的实验课程项目，可以完成的实验内容列表，分为高频原理实验和高频系统实验，触摸实验系统，可出现下图。



高频原理实验细分为八大实验分类, 触摸“高频原理实验”, 显示下图。实验内容分别是小信号调谐放大电路实验、非线性丙类功率放大电路实验、振荡器实验、中频放大器实验、混频器实验、幅度调制与解调实验、变容二极管调频实验、鉴频器实验。如下图所示。



触摸每个实验分类, 可直接进入详细的实验或选择实验项目。

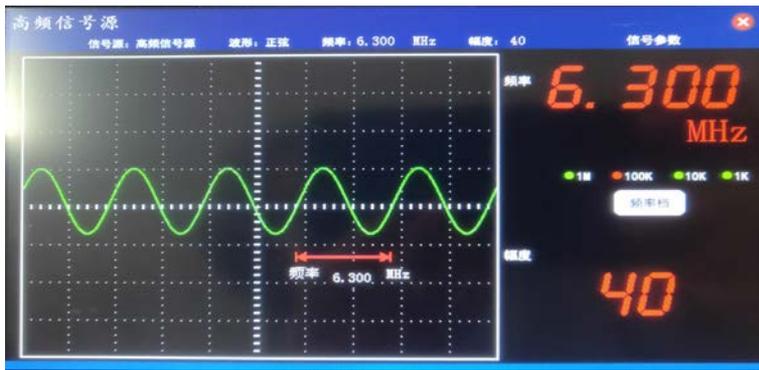
2. 低频信号源

触摸“低频信号源”, 可显示下图界面。信号源的详细说明可以参见第二部分 2.1 部分的详细说明。



3. 高频信号源

触摸“高频信号源”, 显示下图界面。信号源的详细说明可参见第二部分 2-1 的详细说明。



4. 频率计

触摸“频率计”，从频率计输入口输入信号，即可测出信号频率，如下图所示。



5. 扫频仪

触摸“扫频仪”，此时高频信号源输出为1M~10MHZ的扫频信号，利用扫频仪可测出单调谐、双调谐、中频放大谐振曲线和相位鉴频特性曲线，详细说明参见第二部分扫频仪介绍。

6. 高频故障



在学生实验过程中，教师可以无线接入并控制实验平台实验，人为改变实验系统参数，完成对学生实验课程的考核测评，实验箱记录故障的数目和实验箱的编号。

三、实验平台系统实验方法

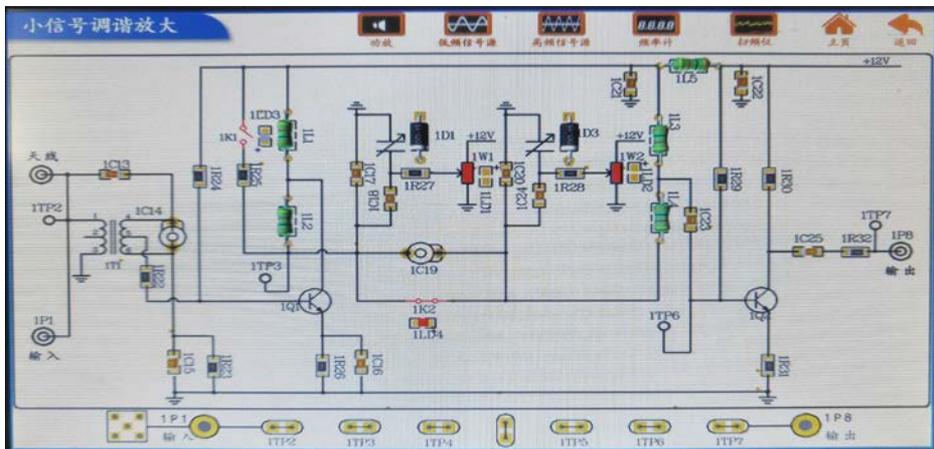
实验平台采用实验原理框图为主线引导的方式，展现实验的原理过程，并将实验过程中的细节展开，涉及的实验参数可在框图上调整。不同于以往传统实验箱，本实验平台中的实验参数都是在实验原理的基础上，通过上位机软件的方式展现实验过程，旋钮、拨码开关、电位器等都能在上位机软件中实现。

下面以小信号放大实验为例说明一些实验中的细节注意点。

- (1) 进入小信号放大实验。在系统平台主界面选择触摸“实验系统”进入，由于将小信号放大实验归类为原理实验，所以选择“高频原理实验”进入。选择“高频原理实验”后，屏幕显示下图，然后选择“小信号调谐放大电路实验”。其它实验进入方式同此。

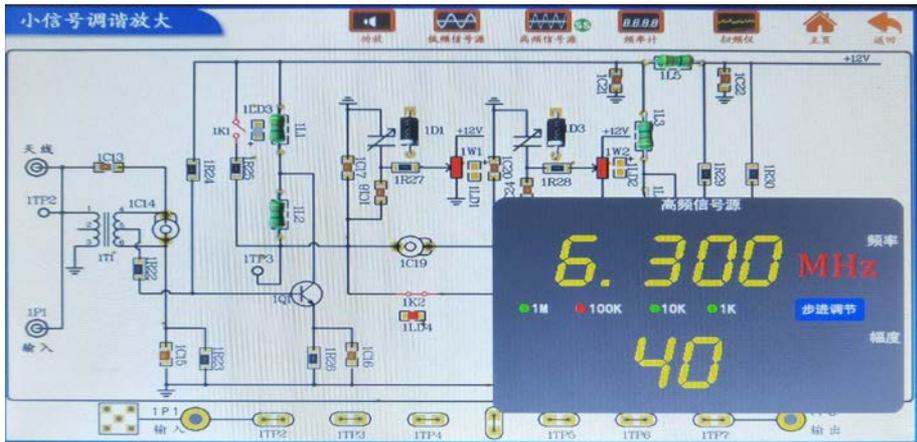


- (2) 进入小信号调节放大实验后，看到的是与实验模块相对应的实验原理图，如下图所示，图中展示出了实验的实现原理以及实验测量点位号，位号与实验模块上位号一致。原理图中的可调电阻样式和开关样式表示此处可以点击设置实验输入参数，旋转相应的实验模块上右下角的编码器旋钮可调节参数。以此实验为例，“1K1”、“1K2”、“1W1”、“1W2”、四个为实验可调参数点。我们可以通过触摸在原理图界面上所需要调节的参数点，或者按动模块右下角编码器来选择调节的参数点，按动编码器后屏幕上会显示出调节参数点的位号，然后调节实验模块右下角的编码器来进行参数调节。

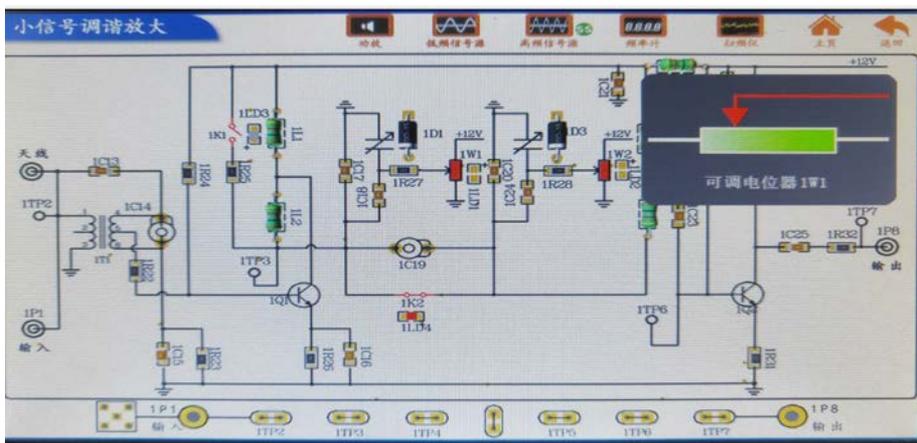


- (3) 用铆孔线将主控模块的高频信号源连接 A1 模块的 1P1 送入信号。

- (4) 点击屏幕原理图上方的“高频信号源”弹出信号源设置界面，信号源设置可以参见 2.1 的信号源介绍说明。如下图所示。



- (5) 点击“可调电位器 1W1”弹出电阻设置界面，如下图所示，调节实验模块右下角的编码器来进行参数调节。



- (6) 依据该实验的测量点说明，用示波器测量各个位号点的信号波形。

上述即为实验过程的一般流程，所有实验可参考上述流程。

四、教材编写常识

在平台研发及教材编写过程中，默认采用了一些习惯用语，下面将部分习惯用法给出说明，以便理解。

- (1) 在实验中，每个板子均有测量点和对应的铆孔，测量点和对应铆孔在电路板短接，信号相同；测量铆孔采用 xPxx 的命名规则，其中 P 前面的数字代表板号，P 后面的数字代表该铆孔在板子上的序号。例如 1P1 和 2P2 分别对应了板 1 上的测量孔和板 2 上的测量孔。
- (2) 实验中连线时需要注意，连线铆孔分输入孔和输出孔。在实验室先要确定每

个铆孔的功能，原则上不能将两个输出孔连接在一起。

- (3) 实验中，对应的实验步骤选用示波器默认为双通道示波器，但实际中用四通道示波器会有更好的实验效果。

五、实验注意事项

- (1) 为实验箱加电前，要简单检查一下实验箱是否有明显的损坏现象；加电时，观察实验箱右上角的电源指示灯是否正常显示，如果指示灯闪烁，请立即关闭实验箱，并检查故障原因。
- (2) 实验箱盖子翻开后，可以取下。但是取下和安装时，都需要注意后端的卡轴是否完全卡好。在没有完全卡好卡轴的情况下关闭实验箱，会对卡轴造成损坏。另外，每台实验箱的盖子和箱体编号是对应的（箱体和盖子后端均有编号），不对应无法安装，因此实验时应妥善保管实验箱盖子，以防弄混。
- (3) 实验模块更换时，需要小心轻拿轻放，确认模块完全放置妥当，再下压有机玻璃盖子，防止损坏电路板和对应槽位。
- (4) 实验箱上参数可调的元器件，如电位器，拨码开关，轻触开关，要小心使用，尽量避免用力过大，造成元器件损坏。以上元器件为磨损器件，在使用时掌握使用技巧，请不要频繁按动或旋转。
- (5) 由于模块版本更新问题，实验图片仅作为参考，以实际测试结果为准。

第 2 部分 高频电子预备性实验

2.1 中控模块内置仪表使用

一、实验目的

1. 了解 DDS 信号源的工作原理；
2. 掌握 RZ9653 实验平台 DDS 信号源使用方法；
3. 理解 DDS 信号源各种输出信号的特性；
4. 熟悉扫频仪使用；

二、实验仪器

1. RZ9653 实验平台
2. 实验模块：
 - 主控模块
3. 100M 双通道示波器

三、DDS 信号源

1. DDS 信号产生原理

直接数字频率合成 (DDS—Digital Direct Frequency Synthesis)，是一种全数字化的频率合成器，由相位累加器、波形 ROM、D/A 转换器和低通滤波器构成。时钟频率给定后，输出信号的频率取决于频率控制字，频率分辨率取决于累加器位数，相位分辨率取决于 ROM 的地址线位数，幅度量化噪声取决于 ROM 的数据位字长和 D/A 转换器位数。

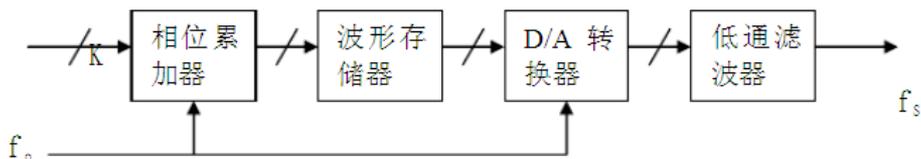


图 2-1 DDS 信号源产生原理

2. DDS 信号操作设置

主控模块可以提供两路 DDS 信号源（低频和高频），可以生成各种类型的信号，提供可调的频率，幅度。信号源可以单独设置使用，也可在实验时结合实验内容进行操作设置。

在本节主要了解两路 DDS 信号源的使用方法。打开实验箱电源，等待系统启动。

以低频信号源为例，选择“低频信号源”功能，进入信号源设置页面，如下图所示。



图 2-2 低频信号源操作界面

在信号源设置页面上，标注了各个区域的基本功能，下面对每个功能做简单的介绍。

- 信号波形选择：低频信号源可以输出以下类型：
 - ◇ 正弦波
 - ◇ 方波
 - ◇ 三角波
 - ◇ 调幅（组合）
 - ◇ 调频（组合）
 - ◇ 双边带（组合）
 - ◇ 音乐信号

高频信号源输出正弦波，频率范围 1KHz-20MHZ。

- 信号源信息显示：显示当前信号参数：波形，频率，幅度；
- 信号幅度调节：信号幅度可以通过主控模块上的幅度旋钮 2（SS2）进行调节。低频信号源幅度的大小直接显示在屏幕上，显示的幅度为峰~峰值，高频信号源显示当前幅度的相对大小，不代表幅度的实际大小，数值越大代表实际输出幅度越大；数值越小代表实际输出幅度越小。
- 频率调节：触摸“频率档”，可以切换频率的调节档位，低频信号源档位可在 10k/1k/100hz 切换。调节主控模块上频率旋钮（SS1）可调节频率。

3. DDS 信号输出及说明

DDS 信号源通过主控模块的铆孔输出，下面对各个铆孔的功能进行说明：

- 低频：输出低频的设置信号；
- 高频：输出高频信号；
- 旋钮 1（SS1）：调节低频或高频信号的输出频率；
- 旋钮 2（SS2）：调节低频或高频信号的输出幅度；

四、扫频仪

1. 扫频仪是通信电子线路中最常用仪表之一，它能直接显示并测出谐振回路、滤波器等电路的幅频特性；扫频仪主要有三部分组成：一个等幅的扫频信号源，一个幅频特性检出电路，一个幅频特性采集显示电路；

2. 扫频仪界面说明

实验平台通过人机对话可设置各种参数，并能在屏幕上显示幅频特性，学生可通过频标读出特性曲线任一点频率，显示屏右侧显示出参数的设置项，触摸参数项，调整（SS2）旋钮可改变参数。

3. 使用

实验平台内置扫频仪（扫频范围 1MHZ-10MHZ）可测单调谐、双调谐谐振曲线，中频放大器选频特性曲线，电容耦合相位鉴频 S 曲线；

实验时选择扫频仪功能，用连接线将高频信号和待测电路输入端相连，将待测电路输出信号和扫频仪输入端相连。

五、实验内容及步骤

1. 加电

打开系统电源开关，底板的电源指示灯正常显示。若电源指示灯显示不正常，请立即关闭电源，查找异常原因。

2. 信号输出类型调节

进入低频信号源设置页面，通过触摸显示屏选择输出类型，使其分别输出 1. 正弦波，2. 方波，3. 三角波，4. 调频，5. 调幅，6. 双边带，7. 音乐信号等。

3. 信号频率调节

旋转 SS1 “频率” 旋钮，在““正弦波”、“三角波”、“方波” 等输出状态时，可步进式调节输出信号的频率，顺时针旋转频率每步增加 100HZ，逆时针每步减小 100HZ。

在其它 DDS 信号（如调幅、调频等）序号，旋转频率旋钮（SS1）其频率不变化。

4. 输出信号幅度调节

调节幅度旋钮（SS2），可改变高频信号，低频信号输出（正弦波、方波、三角波）信号幅度。

5. 用示波器观察 DDS 信号源产生的信号，并记录波形。

完成下面的实验任务：

- 低频输出 2k 正弦波，调节使 V_{p-p} （峰峰值）=2V；
- 低频输出 4k 三角波，调节 V_{p-p} （峰峰值）=3V；
- 低频输出 6.8k 方波，调节 V_{p-p} （峰峰值）=2.5v；
- 低频输出调幅信号；
- 低频输出双边带信号；
- 低频输出调频信号；

6. 扫频仪使用见相关实验内容；

六、实验报告要求

1. 简叙 DDS 信号源工作原理。
2. 画出 DDS 信号源各种输出信号波形，并说明其幅度、频率等调节方法。

第 3 部分 高频电子实验

实验 1 小信号调谐放大器（单调谐与双调谐放大器）

1-1 小信号调谐放大器基本工作原理

一. 概述

在无线电技术中，经常会遇到这样的问题——所接收到的信号很弱，而这样的信号又往往与干扰信号同时进入接收机。我们希望将有用的信号放大，把其它无用的干扰信号抑制掉。借助于选频放大器，便可达到此目的。小信号调谐放大器便是这样一种最常用的选频放大器，即有选择地对某一频率的信号进行放大的放大器。

小信号调谐放大器是构成无线电通信设备的主要电路，其作用是放大信道中的高频小信号。所谓小信号，通常指输入信号电压一般在微伏至毫伏数量级，放大这种信号的放大器工作在线性范围内。所谓调谐，主要是指放大器的集电极负载为调谐回路（如 LC 谐振回路）。这种放大器对谐振频率 f_0 的信号具有最强的放大作用，而对其他远离 f_0 的频率信号，放大作用很差。调谐放大器的频率特性如图 1-1 所示。

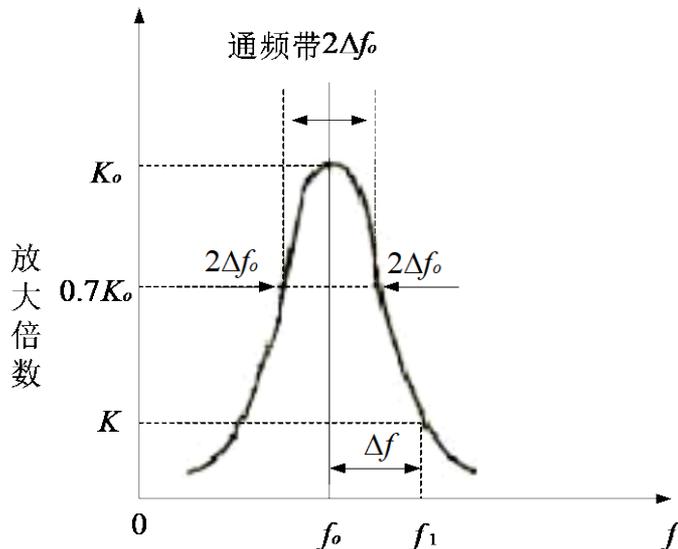


图 1-1 调谐放大器的频率特性

调谐放大器主要由放大器和调谐回路两部分组成。因此，调谐放大器不仅有放大作用，而且还有选频作用。本章讨论的小信号调谐放大器，一般工作在甲类状态，多用在接收机中做高频和中频放大，对它的主要指标要求是：有足够的增益，满足通频带和选择性要求，工作稳定等。

二. 单调谐放大器

小信号调谐放大器的种类很多，按调谐回路区分，有单调谐放大器、双调谐放大器和参差调谐放大器。按晶体管连接方法区分，有共基极、共发射极和共集电极调谐放大器，等等。下面我们讨论共发射极单调谐放大器。

共发射极单调谐放大器原理电路如图 1-2 所示。

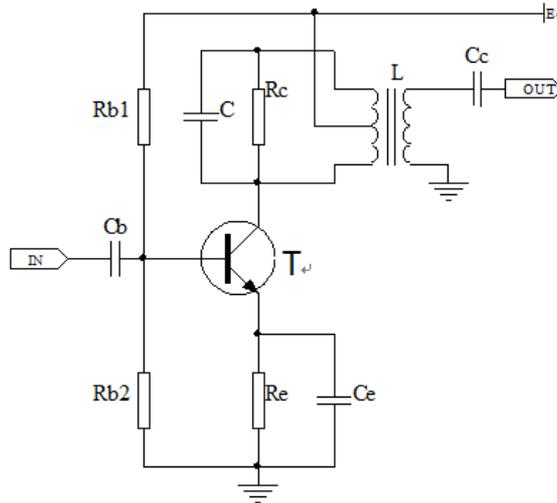


图 1-2

图中晶体管 T 起放大信号的作用， R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_e 为直流偏置电阻，用以保证晶体管工作于放大区域，从而放大器工作于甲类。 C_e 是 R_e 的旁路电容， C_b 、 C_c 是输入、输出耦合电容， L 、 C 是谐振回路作为放大器的集电极负载起选频作用，它采用抽头接入法，以减轻晶体管输出电阻对谐振回路 Q 值的影响， R_c 是集电极（交流）电阻，它决定了回路 Q 值、带宽。

三. 双调谐回路放大器

双调谐回路放大器具有频带宽，选择性好的优点。顾名思义，双调谐回路是指有两个调谐回路：一个靠近“信源”端（如晶体管输出端），称为初级；另一个靠近“负载”端（如下级输入端），称为次级。两者之间，可采用互感耦合，或电容耦合。与单调谐回路相比，双调谐回路的矩形系数较小，即：它的谐振曲线更接近于矩形。图 1-3 为电容耦合双调谐回路谐振放大器原理图。

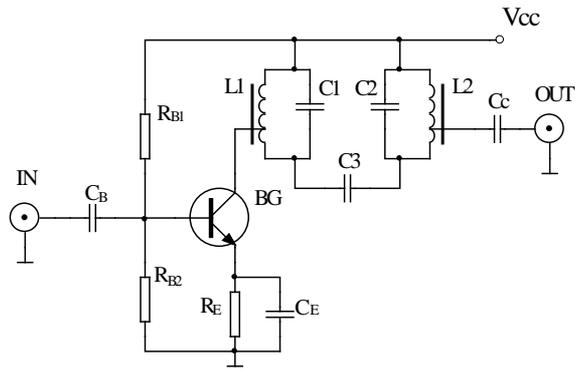


图 1-3 电容耦合双调谐回路放大器原理电路

图中， R_{B1} 、 R_{B2} 、 R_E 为直流偏置电阻，用以保证晶体管工作于放大区域，且放大器工作于甲类状态， C_E 为 R_E 的旁通电容， C_B 和 C_C 为输入、输出耦合电容。图中两个谐振回路： L_1 、 C_1 组成了初级回路， L_2 、 C_2 组成了次级回路。两者之间并无互感耦合（必要时，可分别对 L_1 、 L_2 加以屏蔽），而是由电容 C_3 进行耦合，故称为电容耦合。

1-2 小信号调谐放大器实验电路

图 1-4 为小信号调谐放大器实验电路。图中，1P1 为信号输入口，当做实验时，高频信号由此输入。1TP2 为输入信号测试点。接收天线用于构成收发系统时接收发方发出的信号。变压器 1T1 和电容 1C13、1C14 组成输入选频回路，用来选出所需要的信号。晶体三极管 1Q1 用于放大信号，1R24、1R23 和 1R26 为三极管 1Q1 的直流偏置电阻，用以保证晶体管工作于放大区域，且放大器工作于甲类状态。三极管 1Q1 集电极接有 LC 调谐回路，用来谐振于某一工作频率上。本实验电路设计有单调谐与双调谐回路，由开关 1K2 控制。当 1K2 断开时，为电容耦合双调谐回路，1L1、1L2、1C17 和变容管 1D1 组成了初级回路，1L3、1L4、变容管 1D3、1C20 组成了次级回路，两回路之间由电容 1C19 进行耦合，调整 1C19 可调整其耦合度。当开关 1K2 接通时，即电容 1C19 被短路，此时两个回路合并成单个回路，故该电路为单调谐回路。图中 1W1、1W2 用来调整变容管上直流电压，通过改变直流电压，即可改变变容二极管的电容，达到对回路的调谐。图中开关 1K1 控制 1R25 是否接入集电极回路，1K1 接通时，将电阻 1R25 ($2K\Omega$) 并入回路，使集电极负载电阻减小，回路 Q 值降低，放大器增益减小。图中 1R29、1R30、1R31 和三极管 1Q2 组成放大器，用来对所选信号进一步放大。1TP7 为输出信号测试点，1P8 为信号输出口。

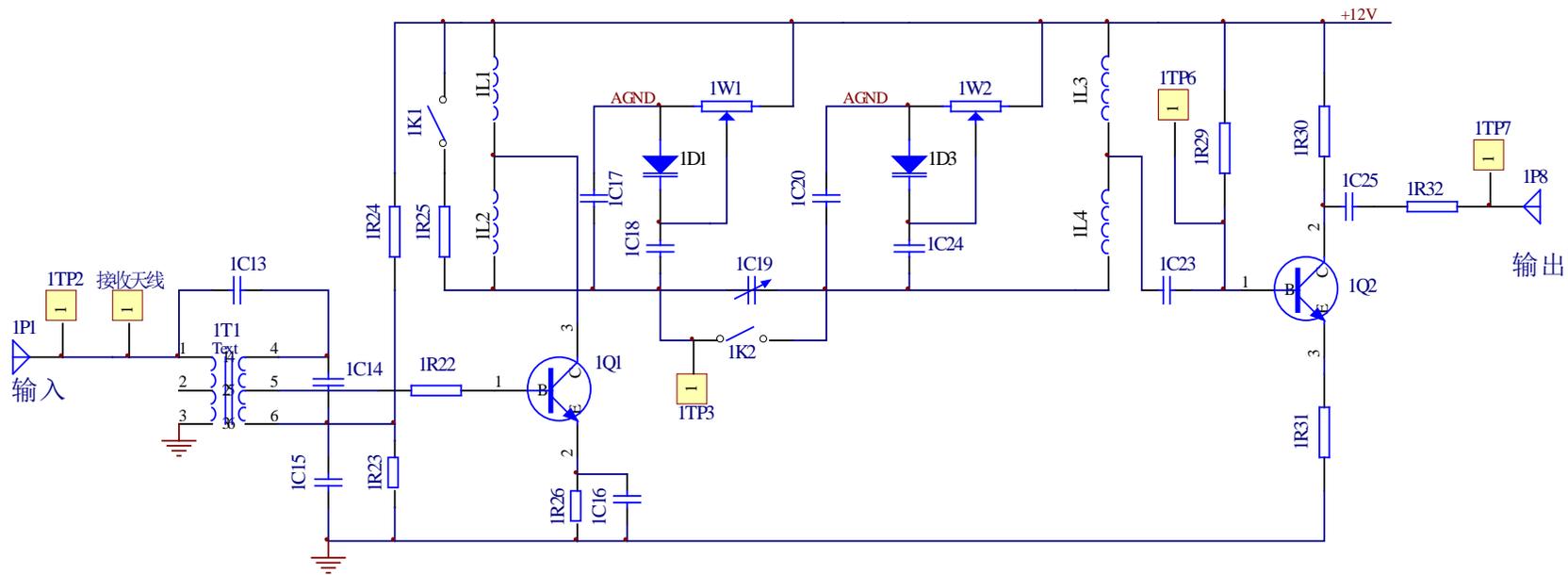


图 1-4 小信号调谐放大器电路图

1-3 小信号调谐放大器实验目的、内容和步骤

一. 实验目的

1. 熟悉电子元件和高频电子线路实验系统；
2. 掌握单调谐和双调谐放大器的基本工作原理；
3. 掌握测量放大器幅频特性的方法；
4. 熟悉放大器集电极负载对单调谐和双调谐放大器幅频特性的影响；
5. 了解放大器动态范围的概念和测量方法。

二. 实验内容

1. 采用点测法测量单调谐和双调谐放大器的幅频特性；
2. 用示波器测量输入、输出信号幅度，并计算放大器的放大倍数；
3. 用示波器观察耦合电容对双调谐回路放大器幅频特性的影响；
4. 用示波器观察放大器的动态范围；
5. 观察集电极负载对放大器幅频特性的影响。

三. 实验步骤

1. 实验准备

在实验箱主板上插装好无线接收与小信号放大模块，接通实验箱上电源开关，此时模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。

2. 单调谐回路谐振放大器幅频特性测量

测量幅频特性通常有两种方法，即扫频法和点测法。扫频法简单直观，可直接观察到单调谐放大特性曲线，但需要扫频仪。点测法采用示波器进行测试，即保持输入信号幅度不变，改变输入信号的频率，测出与频率相对应的单调谐回路谐振放大器的输出电压幅度，然后画出频率与幅度的关系曲线，该曲线即为单调谐回路谐振放大器的幅频特性。

(1) 扫频法，即用扫频仪直接测量放大器的幅频特性曲线。利用本实验箱上的扫频仪测试的方法是：开机后点击显示屏，选择“实验系统”中“高频原理实验”，点击“小信号调谐放大实验”，屏幕上将显示小信号调谐放大实验原理图，点击原理图上方“扫频仪”。将显示屏下方的“高频”信号源（此时为扫频信号源）接入小信号放大的输入端（1P1），将显示屏下方的“扫频”仪与小信号放大的输出（1P8）相连。按动无线接收与小信号放大模块上的编码器（1SS1），选择1K2指示灯常亮，若1K2指示灯闪烁，旋转编码器（1SS1）使1K2指示灯长亮，此时小信号放大为单调谐。显示屏上显示的曲线即为单调谐幅频特性曲线，调整1W1、1W2曲线会有变化。用扫频仪测出的单调谐放大器幅频特性曲线如下图：

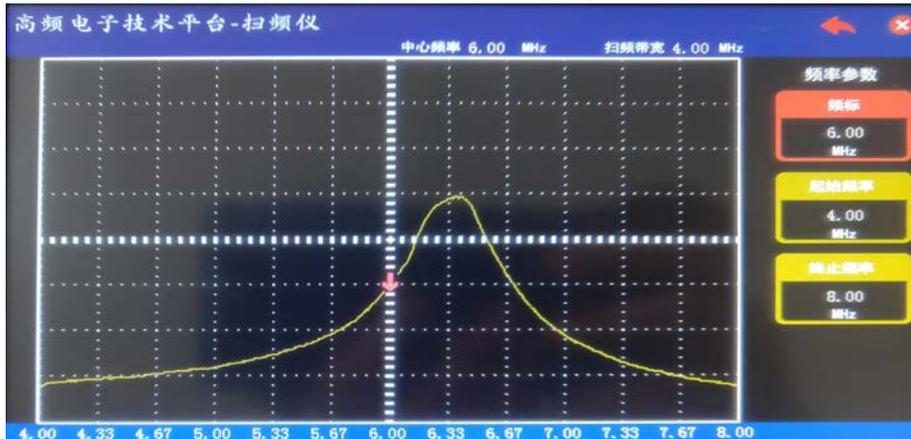


图1-5 扫频仪测量的幅频特性

(2) 点测法，其步骤如下（显示屏先回到初始界面）：

① 点击显示屏，选择“实验系统”中“高频原理实验”，然后再选择“小信号调谐放大电路实验”，选择“小信号调谐放大”后，显示屏上显示小信号调谐放大器原理电路图。点击显示屏上 1K2 开关，（或按动模块上编码器 1SS1 选择 1K2），显示屏右上方显示 1K2 开关式样（5 秒后会自动消失），旋转编码器 1SS1 使开关接通，此时模块上对应的 1K2 指示灯点亮，1C19 被短路，放大器为单调谐回路。

② 将显示屏下方的“高频”信号源连接到小信号放大器输入端（1P1），示波器 CH1 接放大器输入端 1TP2，示波器 CH2 接放大器输出端 1TP7。点击显示屏原理图上方“高频信号源”，显示屏右下方频率显示为 6.3MHz，高频信号源开机默认值为 6.3MHz。旋转显示屏右下方幅度旋钮（SS2），调整高频信号源输出幅度（峰-峰值）为 200mv（示波器 CH1 监测），调整 1W1 和 1W2，使放大器输出为最大值（示波器 CH2 监测），点击显示屏原理图上 1W1 或 1W2（或按动编码器 1SS1 选择 1W1 或 1W2），此时模块上相应指示灯点亮，旋转编码器 1SS1，即可调整其回路电容的大小。调整 1W1、1W2 使放大器输出幅度达到最大时，此时放大器谐振回路谐振于 6.3MHz。比较此时输入输出幅度大小，并算出放大倍数。

③ 按照表 1-1 改变高频信号源的频率，保持高频信号源输出幅度为 200mv（示波器 CH1 监测），从示波器 CH2 上读出与频率相对应的单调谐放大器的电压幅值，并把数据填入表 1-1。调频率时，旋转显示屏下方左侧“频率”旋转（SS1），每旋一档即改变 100KHZ。

表 1-1

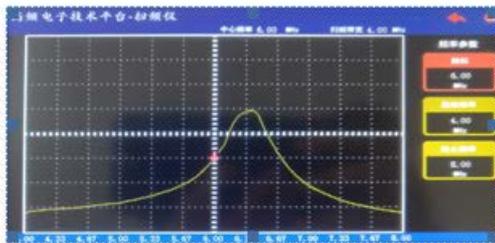
输入信号频率 f (MHz)	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3	7.5
输出电压幅值 U (mv)														

④ 以横轴为频率，纵轴为电压幅值，按表1-1，画出单调放大器的幅频特性曲线。

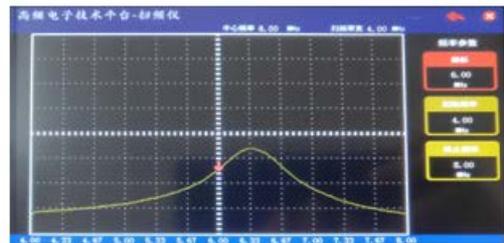
3. 观察集电极负载对单调谐放大器幅频特性的影响

当放大器工作于放大状态下，按照上述幅频特性的测量方法测出接通与不接通1R25的幅频特性曲线。（点击显示屏原理图中1K1，或按动编码器（1SS1）选择1K1，显示屏右上方会显示出1K1开关式样，旋转编码器1SS1，使开关1K1接通或不接通。模块上1K1指示灯点亮时为接通，不亮时为断开）。可以发现：当不接1R25时，集电极负载增大，幅频特性幅值加大，曲线变“瘦”，Q值增高，带宽减小。而当接通1R25时，幅频特性幅值减小，曲线变“胖”，Q值降低，带宽加大。

用扫频仪测出接通与不接通1R25的幅频特性曲线，如下图：



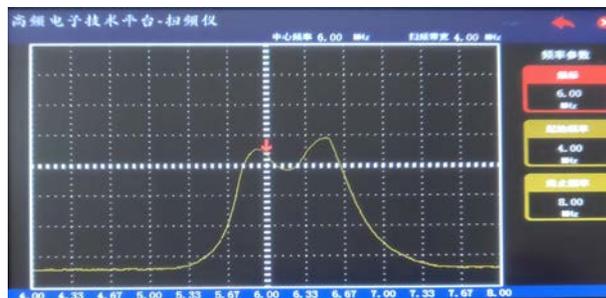
不接1R25时的幅频特性曲线



接1R25时的幅频特性曲线

4. 双调谐回路谐振放大器幅频特性测量

电路原理图中 1K2 断开时为双调谐回路放大器。与单调谐的测量方法完全相同，可用扫频法和点测法。下图为用扫频仪测得的双调谐幅频特性曲线（1K1 不接通）。



用扫频仪测得的双调谐幅频特性曲线

点测法，步骤如下：

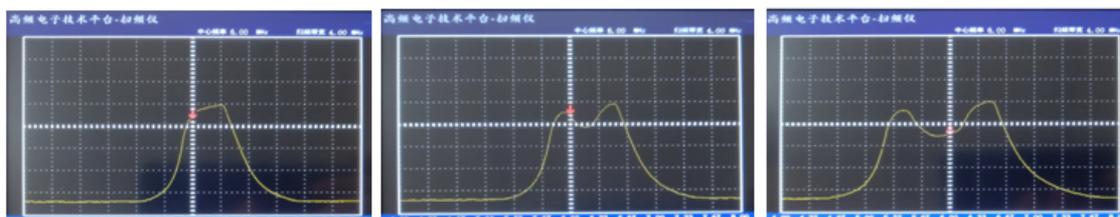
① 1K2 置“断开”，点击显示屏原理图中 1K2，旋转编码器 1SS1 使 1K2 断开，此时模块中 1K2 指示灯熄灭。1K2 指示灯熄灭时，接通 1C19。原理图中 1K1 至“断开”，（点击 1K1，旋转编码器 1SS1 使 1K2 断开，此时模块中 1K1 指示灯熄灭）。点击显示屏上方“高频信号源”使高频信号源输出频率 6.3MHz，幅度 200mv，然后将显示屏下方的“高频”信号源接入调谐放大器的输入端（1P1）。示波器 CH1 接 1TP2，示波器 CH2 接放大器的输出（1TP7）端。

② 按照表 1-2 改变高频信号源的频率，保持高频信号源输出幅度峰-峰值为 200mv（示波器 CH1 监视），从示波器 CH2 上读出与频率相对应的双调谐放大器的幅度值，并把数据填入表 1-2。

放大器输入信号 频率 f (Mhz)	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7
放大器输出幅度 U (mv)														

- ③测出两峰之间凹陷点的大致频率是多少？
- ④以横轴为频率，纵轴为幅度，按照表 1-2，画出双调谐放大器的幅频特性曲线。
- ⑤调整 1C19 的电容，按照上述方法测出改变 1C19 时幅频特性曲线。

下图为用扫频仪测得的不同 1C19 时的幅频特性曲线



耦合电容减小扫频曲线

耦合电容 1C19 为某一值时扫频曲线

耦合电容 1C19 增大时扫频曲线

5. 放大器动态范围测量

1K1 置“断开”，点击 1K1，旋转 1SS1 使 1K1 指示灯熄灭。1K2 置“单调谐”，点击 1K2，旋转 1SS1 使 1K2 指示灯点亮。高频信号源输出接调谐放大器的输入端（1P1），调整高频信号源频率至 6.3MHz，幅度 150mv。示波器 CH1 接 1TP2，示波器 CH2 接调谐放大器的输出（1TP7）端，（调整 1W1、1W2 使放大器输出为最大）。按照表 1-3 放大器输入幅度，改变高频信号源的输出幅度（由 CH1 监测）。从示波器 CH2 读出放大器输出幅度值，并把数据填入表 1-3（表格里数据可自行进行调整，这里仅作参考），且计算放大器电压放大倍数。可以发现，当放大器的输入增大到一定数值时，放大倍数开始下降，输出波形开始畸变（失真）。

表 1-3

放大器输入 (mV)	150	180	200	230	250	280	310	350	400	500
放大器输出 (V)										
放大器电压放大倍数										

四. 实验报告要求

1. 画出单调谐和双调谐的幅频特性，计算幅值从最大值下降到 0.707 时的带宽，并由此说明其优缺点。比较单调谐和双调谐在特性曲线上有何不同？
2. 画出放大器电压放大倍数与输入电压幅度之间的关系曲线。
3. 当放大器输入幅度增大到一定程度时，输出波形会发生什么变化？为什么？
4. 总结由本实验所获得的体会。

实验 2 正弦波振荡器（LC 振荡器和晶体振荡器）

2-1 正弦波振荡器的基本工作原理

振荡器是指在没有外加信号作用下的一种自动将直流电源的能量变换为一定波形的交变振荡能量的装置。

正弦波振荡器在电子技术领域中有着广泛的应用。在信息传输系统的各种发射机中，就是把主振荡器（振荡器）所产生的载波，经过放大、调制而把信息发射出去的。在超外差式的各种接收机中，是由振荡器产生一个本地振荡信号，送入混频器，才能将高频信号变成中频信号。

振荡器的种类很多。从所采用的分析方法和振荡器的特性来看，可以把振荡器分为反馈式振荡器和负阻式振荡器两大类。我们只讨论反馈式振荡器。根据振荡器所产生的波形，又可以把振荡器分为正弦波振荡器与非正弦波振荡器。我们只介绍正弦波振荡器。

常用正弦波振荡器主要由决定振荡频率的选频网络和维持振荡的正反馈放大器组成，这就是反馈振荡器。按照选频网络所采用元件的不同，正弦波振荡器可分为 LC 振荡器、RC 振荡器和晶体振荡器等类型。

一. 反馈型正弦波自激振荡器基本工作原理

以互感反馈振荡器为例，分析反馈型正弦波自激振荡器的基本原理，其原理电路如图 2-1 所示。

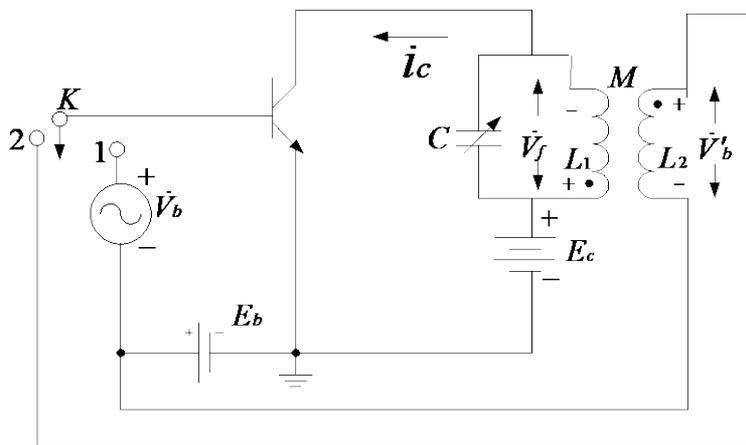


图 2-1

当开关 K 接“1”时，信号源 \dot{V}_b 加到晶体管输入端，这就是一个调谐放大器电路，集电极回路得到了一个放大的信号 \dot{V}_F 。

当开关 K 接“2”时，信号源 \dot{V}_b 不加入晶体管，输入晶体管是 \dot{V}_F 的一部分 \dot{V}'_b 。若适当选择互感 M 和 \dot{V}_F 的极性，可以使 \dot{V}_b 和 \dot{V}'_b 大小相等，相位相同，那么电路一定能维持高频振荡，达到自激振荡的目的。实际上起振并不需要外加激励信号，靠电路内部扰动即

可起振。

产生自激振荡必须具备以下两个条件：

1. 反馈必须是正反馈，即反馈到输入端的反馈电压与输入电压同相，也就是 \dot{V}_b 和 \dot{V}'_b 同相。
2. 反馈信号必须足够大，如果从输出端送回到输入端的信号太弱，就不会产生振荡了，也就是说，反馈电压 \dot{V}'_b 在数值上应大于或等于所需要的输入信号电压 \dot{V}_b 。

二. 电容三点式 LC 振荡器

LC 振荡器实质上是满足振荡条件的正反馈放大器。LC 振荡器是指振荡回路是由 LC 元件组成的。从交流等效电路可知：由 LC 振荡回路引出三个端子，分别接振荡管的三个电极，而构成反馈式自激振荡器，因而又称为三点式振荡器。如果反馈电压取自分压电感，则称为电感反馈 LC 振荡器或电感三点式振荡器；如果反馈电压取自分压电容，则称为电容反馈 LC 振荡器或电容三点式振荡器。

在几种基本高频振荡回路中，电容反馈 LC 振荡器具有较好的振荡波形和稳定度，电路形式简单，适于在较高的频段工作，尤其是以晶体管极间分布电容构成反馈支路时其振荡频率可高达几百 MHz ~ GHz。

1. LC 振荡器的起振条件

一个振荡器能否起振，主要取决于振荡电路自激振荡的两个基本条件，即：振幅起振平衡条件和相位平衡条件。

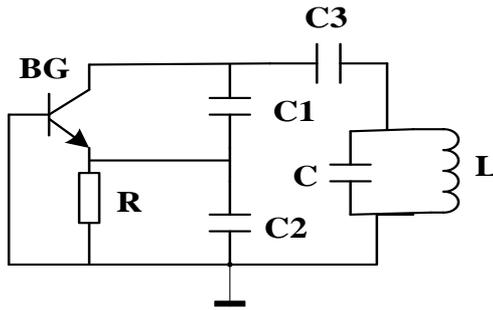
2. LC 振荡器的频率稳定度

频率稳定度表示：在一定时间或一定温度、电压等变化范围内振荡频率的相对变化程度，常用表达式： $\Delta f_0 / f_0$ 来表示 (f_0 为所选择的测试频率； Δf_0 为振荡频率的频率误差， $\Delta f_0 = f_{02} - f_{01}$ ； f_{02} 和 f_{01} 为不同时刻的 f_0)，频率相对变化量越小，表明振荡频率的稳定度越高。由于振荡回路的元件是决定频率的主要因素，所以要提高频率稳定度，就要设法提高振荡回路的标准性，除了采用高稳定和高 Q 值的回路电容和电感外，其振荡管可以采用部分接入，以减小晶体管极间电容和分布电容对振荡回路的影响，还可采用负温度系数元件实现温度补偿。

3. LC 振荡器的调整和参数选择

以实验采用改进型电容三点振荡电路（西勒电路）为例，交流等效电路如图 2-2 所示。

从图可知，该电路 C_2 上的电压为反馈电压，即该电压加在三极管 be 之间。由于该电压形成正反馈，符合振荡器的相位平衡条件。



(1) 静态工作点的计算

合理选择振荡管的静态工作点，对振荡器工作的稳定性及波形的好坏，有一定的影响，偏置电路一般采用分压式电路。

当振荡器稳定工作时，振荡管工作非线性状态，通常是依靠晶体管本身的非线性实现稳幅。若选择晶体管进入饱和区来实现稳幅，则将使振荡回路的等效Q值降低，输出波形变差，频率稳定度降低。因此，一般在小功率振荡器中总是使静态工作点远离饱和区，靠近截止区。

(2) 振荡频率f的计算

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(c+c_T)}}$$

式中 c_T 为 C_1 、 C_2 和 C_3 的串联值，因 $C_1(300p) \gg C_3(75p)$ ， $C_2(1000P) \gg C_3(75p)$ ，故 $C_T \approx C_3$ ，所以，振荡频率主要由L、C和 C_3 决定。

(3) 反馈系数F的选择

$$F = \frac{C_1}{C_2}$$

反馈系数F不宜过大或过小，一般经验数据 $F \approx 0.1 \sim 0.5$ ，本实验取 $F = \frac{300}{1000} = 0.3$

4. 克拉泼和西勒振荡电路

图2-3为串联改进型电容三点式振荡电路——克拉泼振荡电路。

图2-4为并联改进型电容三点式振荡电路——西勒振荡电路。

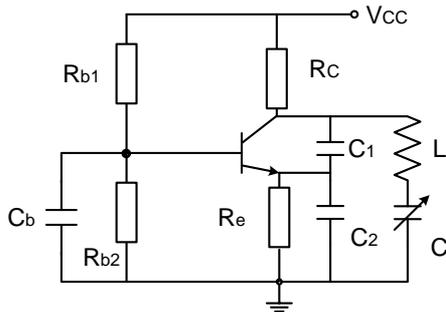


图2-3 克拉泼振荡电路

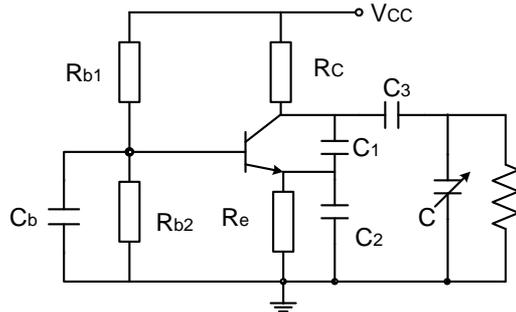


图2-4 西勒振荡电路

三. 石英晶体振荡器

LC 振荡器的频率稳定度主要取决于振荡回路的标准型和品质因素 (Q 值), 在采取了稳频措施后, 频率稳定度一般只能达到 10^{-4} 数量级。为了得到更高的频率稳定度, 人们发明了一种采用石英晶体做的振荡器 (又称石英晶体振荡器), 它的频率稳定度可达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 数量级。石英晶体振荡器之所以具有极高的频率稳定度, 关键是采用了石英晶体这种具有高 Q 值的谐振元件。

图 2-5 是一种晶体振荡器的交流等效电路图。这种电路很类似于电容三点式振荡器, 区别仅在于两个分压电容的抽头是经过石英谐振器接到晶体管发射极的, 由此构成正反馈通路。 C_3 与 C_4 并联, 再与 C_2 串联, 然后与 L_1 组成并联谐振回路, 调谐在振荡频率。当振荡频率等于石英谐振器的串联谐振频率时, 晶体呈现纯电阻, 阻抗最小, 正反馈最强, 相移为零, 满足相位条件。因此振荡器的频率稳定度主要由石英谐振器来决定。在其它频率, 不能满足振荡条件。

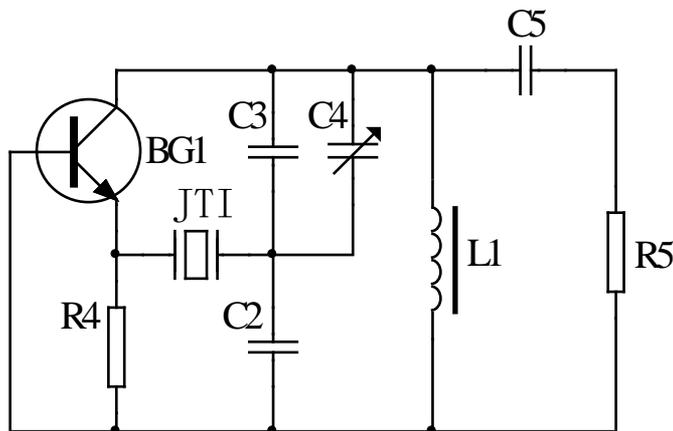


图 2-5 晶体振荡器交流通路

2-2 正弦波振荡器的实验电路

图 2-6 为电容三点式 LC 振荡器实验电路。图中，左侧部分为 LC 振荡器，右侧部分为射极跟随器。

三极管 2Q1 为 LC 振荡器的振荡管，2R21、2R22 和 2R24 为三极管 2Q1 的直流偏置电阻，以保证振荡管 2Q1 正常工作。图中开关 2K1 打到“S”位置时，为改进型克拉泼振荡电路，打到“P”位置时，为改进型西勒振荡电路。图中 2D2 为变容二极管，调整 2W2 即可改变变容管上的直流电压，从而改变变容管的电容，也即控制着振荡频率的变化。调整电位器 2W1 可改变振荡器三极管 2Q1 的电源电压。

当需要 LC 振荡器输出时，需将 2P2、2P4 用短铆孔线连接起来。三极管 2Q3 为射极跟随器，以提高带负载的能力。电位器 2W4 用来调整振荡器输出幅度。2TP5 为输出测量点，2P5 为振荡器输出口。

图中 2-7 为晶体振荡器实验电路，2Q2 为振荡管，2W3、2R27、2R28 和 2R30 为三极管 2Q2 直流偏置电阻，以保证 2Q2 正常工作，调整 2W3 可以改变 2Q2 的静态工作点。图中 2R31、2C23 为去藕元件，2C22 为旁路电容，并构成共基接法。2L2、2C24、2C25 成振荡回路，其谐振频率应与晶体频率基本一致。2C26 为输出耦合电容。2TP3 为晶体振荡器测试点。该晶体振荡器的交流电路与图 2-5 基本相同。

图中 2Q3 构成的射极跟随器与 LC 振荡器共用。当需要晶体振荡器输出时，需将 2P3、2P4 用铆孔线连接起来，经射随后由 2P5 输出。

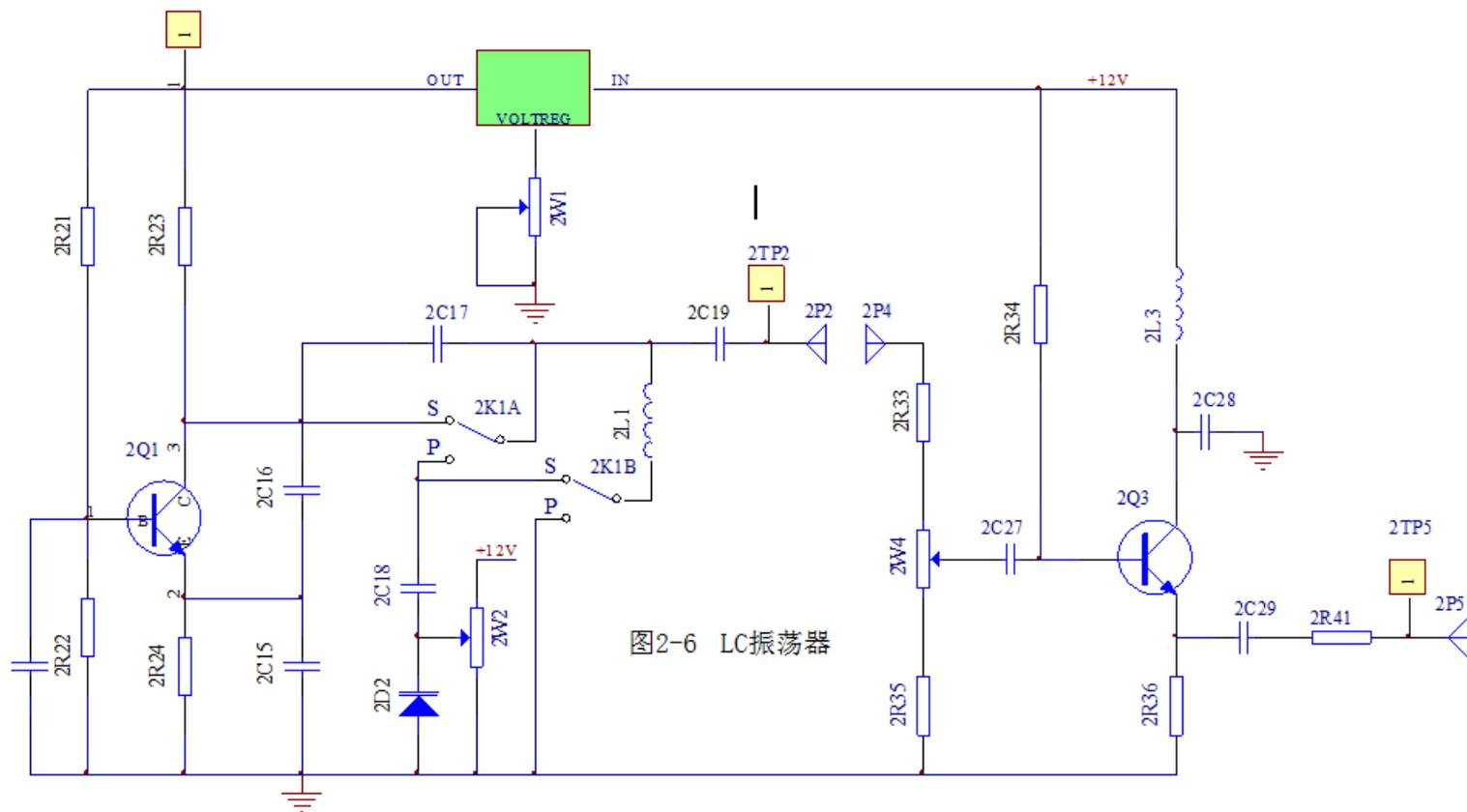


图2-6 LC振荡器

图2-6 LC振荡器

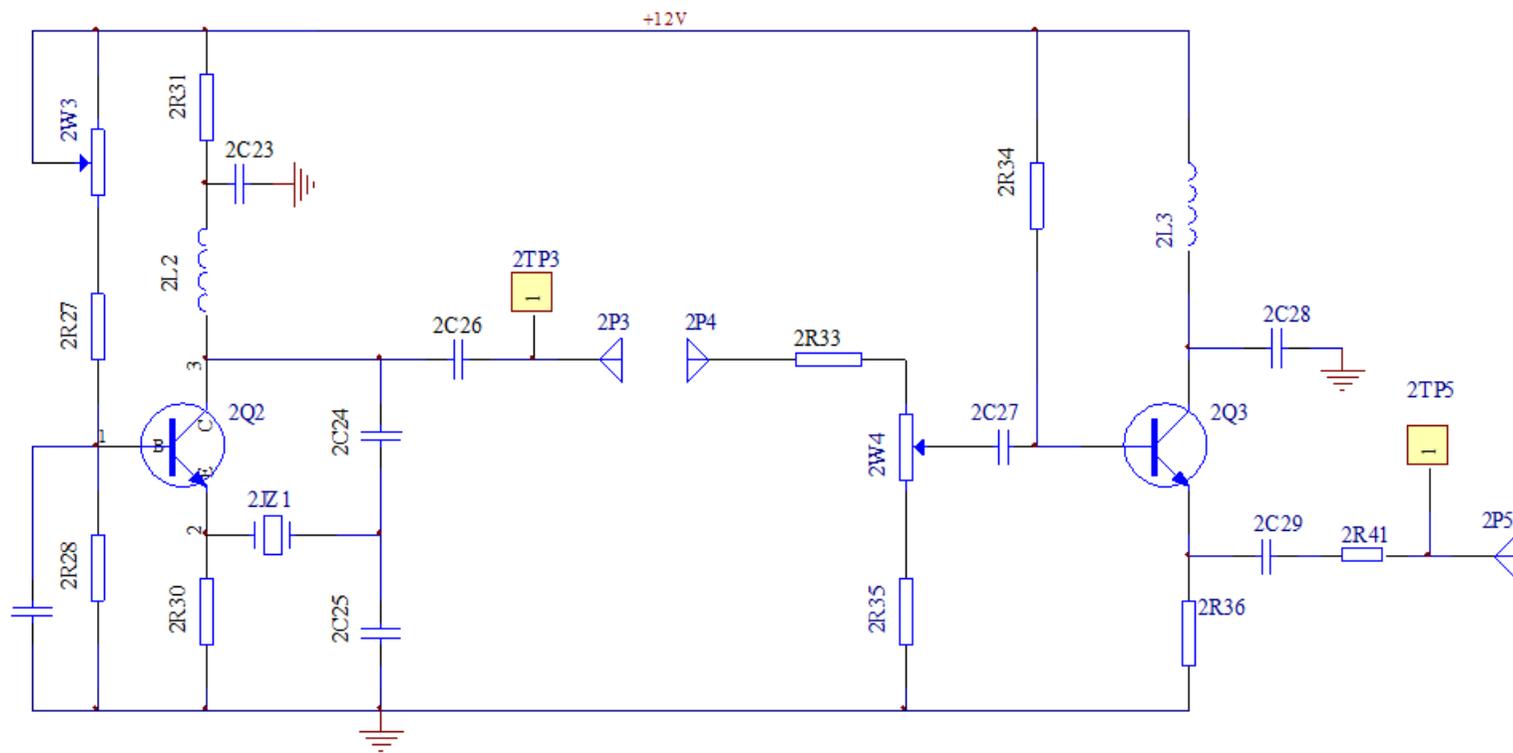


图 2-7 晶体振荡器实验电路

2-3 正弦波振荡器实验目的、内容和步骤

一. 实验目的

1. 掌握电容三点式 LC 振荡电路和晶体振荡器的基本工作原理，熟悉其各元件的功能；
2. 掌握 LC 振荡器幅频特性的测量方法；
3. 熟悉电源电压变化对振荡器振荡幅度和频率的影响；
4. 了解静态工作点对晶体振荡器工作的影响，感受晶体振荡器频率稳定度高的特点。

二. 实验内容

1. 用示波器观察 LC 振荡器和晶体振荡器输出波形，测量振荡器输出电压峰-峰值 V_{p-p} ，并以频率计测量振荡频率；
2. 测量 LC 振荡器的幅频特性；
3. 测量电源电压变化对振荡器的影响；
4. 观察并测量静态工作点变化对晶体振荡器工作的影响。

三、实验步骤

1. 实验准备

插装好正弦振荡器与晶体管混频模块，接通实验箱电源，此时模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。点击显示屏，选择“实验系统”中的“高频原理实验”，然后再选择“振荡器实验”中的“LC 振荡器实验”，显示屏会显示出 LC 振荡器原理实验图。

说明：电路图中各可调元件的调整，其方法是：点击显示屏上要调整的原件，或按动模块上编码器 2SS1 选择需要调整的元件，模块上对应的指示灯点亮，然后旋转编码器 2SS1，即可调整该元件的参数。本实验箱中，各模块可调元件的调整，其方法与此完全相同，后面不再说明。

2. LC 振荡实验（为防止晶体振荡器对 LC 振荡器的影响，应使晶振停振，即调 2W3 使晶振停振，测试 2P3 振荡输出最小。）

（1）西勒振荡电路幅频特性测量

用短铆孔线将 2P2 与 2P4 相连，示波器接 2TP5，频率计与 2P5 相连。开关 2K1（位于实验模块上，需手动拨动）拨至“P”（往下拨），此时振荡电路为西勒电路。调整 2W4 使输出幅度最大。（点击 2W4，旋转 2SS1 来调整。）调整 2W2 可调整变容管 2D2 的直流电压，从而改变变容管的电容，达到改变振荡器的振荡频率，变容管上电压最高时，变容管电容最小，此时输出频率最高。按照表 2-1 电压的变化测出与电压相对应的振荡频率和输出电压（峰-峰值 V_{p-p} ），并将测量结果记于表中，表中电压为变容管 2D2 上的电压，调整 2W2 即可调整其电压，调整 2W2 时，显示屏上会显示其电压。测频率时，点击显示屏上方的“频率计”。

表 2-1

电压 (v)	4	5	6	7	8	9	10	11	12
振荡频率 f (MHZ)									
输出电压 VP-P (v)									

根据所测数据，分析振荡频率与电容变化有何关系，输出幅度与振荡频率有何关系，并画出振荡频率与输出幅度的关系曲线。

(2) 克拉泼振荡电路幅频特性的测量

将开关2K1拨至“S”（往上拨），振荡电路转换为克拉泼电路。按照上述（1）的方法，测出振荡频率和输出电压，并将测量结果记于表2-2中。

表2-2

电压 (V)	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
振荡频率 f (MHZ)											
输出电压 VP-P (v)											

根据所测数据，分析振荡频率与电容变化有何关系，输出幅度与振荡频率有何关系，并画出振荡频率与输出幅度的关系曲线。

3. 晶体振荡器实验

点击显示屏，选择“实验系统”中的“高频原理实验”，然后再选择“振荡器实验”中的“晶体振荡器实验”，显示屏会显示晶体振荡器原理实验图。图中的可调元件可通过点击选择和旋转编码器2SS1来调节。

(1) 用铆孔线将 2P3 与 2P4 相连，将示波器探头接到 2TP5 端，观察晶体振荡器波形，如果没有波形，应调整 2W3 电位器。然后用频率计测量其输出端 2P5 频率，看是否与晶体频率一致（晶体频率为 9.0MHZ）。

(2) 示波器接 2TP5 端，频率计接 2P5 输出口，调节 2W3 以改变晶体管静态工作点，观察振荡波形及振荡频率有无变化。

4. 实验报告要求

(1) 根据测试数据，分别绘制西勒振荡器，克拉泼振荡器的幅频特性曲线，并进行分析比较；

(2) 根据实验，分析静态工作点对晶体振荡器工作的影响；

(3) 总结由本实验所获得的体会。

实验3 混频器（晶体三极管混频器和集成乘法器混频器）

3-1 混频器的基本工作原理

在通信技术中，经常需要将信号自某一频率变换为另一频率，一般用得较多的是把一个已调的高频信号变成另一个较低频率的同类已调信号，完成这种频率变换的电路称混频器。在超外差接收机中的混频器的作用是使波段工作的高频信号，通过与本机振荡信号相混，得到一个固定不变的中频信号。

采用混频器后，接收机的性能将得到提高，这是由于：

(1) 混频器将高频信号频率变换成中频，在中频上放大信号，放大器的增益可以做得很高而不自激，电路工作稳；经中频放大后，输入到检波器的信号可以达到伏特数量级，有助于提高接收机的灵敏度。

(2) 由于混频后所得的中频频率是固定的，这样可以使电路结构简化。

(3) 要求接收机在频率很宽的范围内选择性好，有一定困难，而对于某一固定频率选择性可以做得很好。

混频器的电路模型如图 3-1 所示。

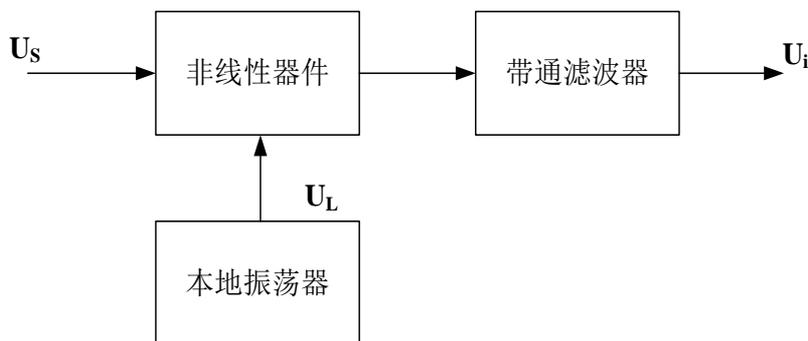


图3-1 混频器电路模型

混频器常用的非线性器件有二极管、三极管、场效应管和乘法器。本地振荡器用于产生一个等幅的高频信号，并与输入信号 U_s 经混频后所产生的差频信号经带通滤波器滤出，这个差频通常叫做中频。输出的中频信号 U_i 与输入信号 U_s 载波振幅的包络形状完全相同，唯一的差别是信号载波频率 f_s 变换成中频频率 f_i 。

目前，高质量的通信接收机广泛采用二极管环形混频器和由差分对管平衡调制器构成的混频器，而在一般接收机（例如广播收音机）中，为了简化电路，还是采用简单的三极管混频器。

一. 三极管混频的基本工作原理

当采用三极管作为非线性元件时就构成了三极管混频器，它是最简单的混频器之一，应用又广，我们以它为例来分析混频器的基本工作原理。

三极管混频器的原理图，如图 3-2 所示。

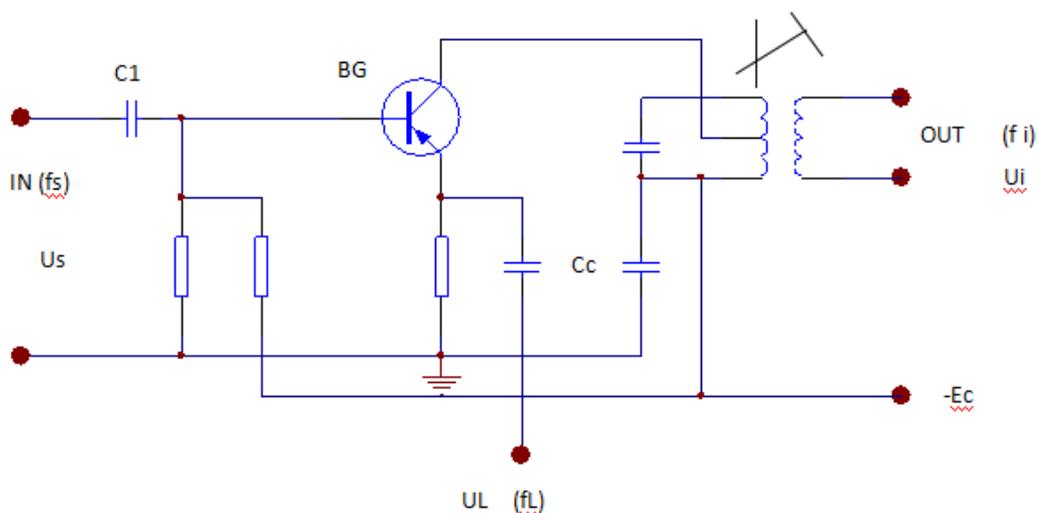


图 3-2

从图可知，输入的高频信号 $u_s(f_s)$ ，通过 C_1 加到三极管的 b 极，而本振信号 $u_L(f_L)$ 经 C_c 耦合，加在三极管的 e 极，这样加在三极管输入端 (be 之间) 信号为 $u_{be} = u_s + u_L$ 。

即两信号在三极管输入端互相叠加。由于三极管的 $i_c \sim u_{be}$ 特性 (即转移特性) 存在非线性，使两信号相互作用，产生很多新的频率成分，其中就包括有用的中频成分 $f_L - f_s$ 和 $f_L + f_s$ ，输出中频回路 (带通滤波器) 将其选出，从而实现混频。

通常混频器集电极谐振回路的谐振频率选择差频即 $f_L - f_s$ ，此时输出中频信号 f_i 比输入信号频率 f_s 低。根据需要有时集电极谐振回路选择和频即 $f_L + f_s$ ，此时输出中频信号 f_i 比输入信号频率 f_s 高，即将信号频率往高处搬移，有的混频器就取和频。

二. 混频干扰及其抑制方法

为了实现混频功能，混频器件必须工作非线性状态，而作用在混频器上的除了输入信号电压 U_s 和本振电压 U_L 外，不可避免地还存在干扰和噪声。它们之间任意两者都有可能产生组合频率，这些组合频率如果等于或接近中频，将与输入信号一起通过中频放大器和检波器，对输出级产生干扰，影响输入信号的接收。

干扰是由于混频不满足线性时变工作条件而形成的，因此不可避免地会产生干扰，其中影响最大的是中频干扰，镜像干扰和组合频率干扰。

通常减弱这些干扰的方法有三种：

- (1) 适当选择混频电路的工作点，尤其是 U_L 不要过大；
- (2) 输入信号电压幅值不能过大，否则谐波幅值也大，使干扰增强；
- (3) 合理选择中频频率，选择中频时应考虑各种干扰所产生的影响。

3-2 混频器的实验电路

1. 晶体三极管混频器实验电路

图 3-3 是晶体三极管混频器实验电路, 由图可看出, 本振电压 U_L 从 2P8 输入, 经 2R50、2C32 送往晶体三极管的发射极。信号电压 (频率为 6.3MHZ) 从 2P6 输入, 经 2R49、2C30 送往晶体三极管的基极。混频后的中频信号由晶体三极管的集电极输出, 集电极的负载由 2L5、2C36 和变容管 2D8 构成谐振回路, 该谐振回路调谐在中频 $f_i = f_L - f_s$ 上。本实验中频 $f_i = 2.5\text{MHZ}$, 由于信号频率 $f_s = 6.3\text{MHZ}$, 所以本振频率为 8.8MHZ, 即中频 $f_i = f_L - f_s = 8.8\text{MHZ} - 6.3\text{MHZ} = 2.5\text{MHZ}$ 。谐振回路选出的中频经 2C38 耦合, 由 2P9 输出。图中电位器 2W5 用来调整晶体三极管 2Q4 静态工作点。2W6 用来调整变容管 2D8 上的偏压, 从而调整中频的谐振频率。

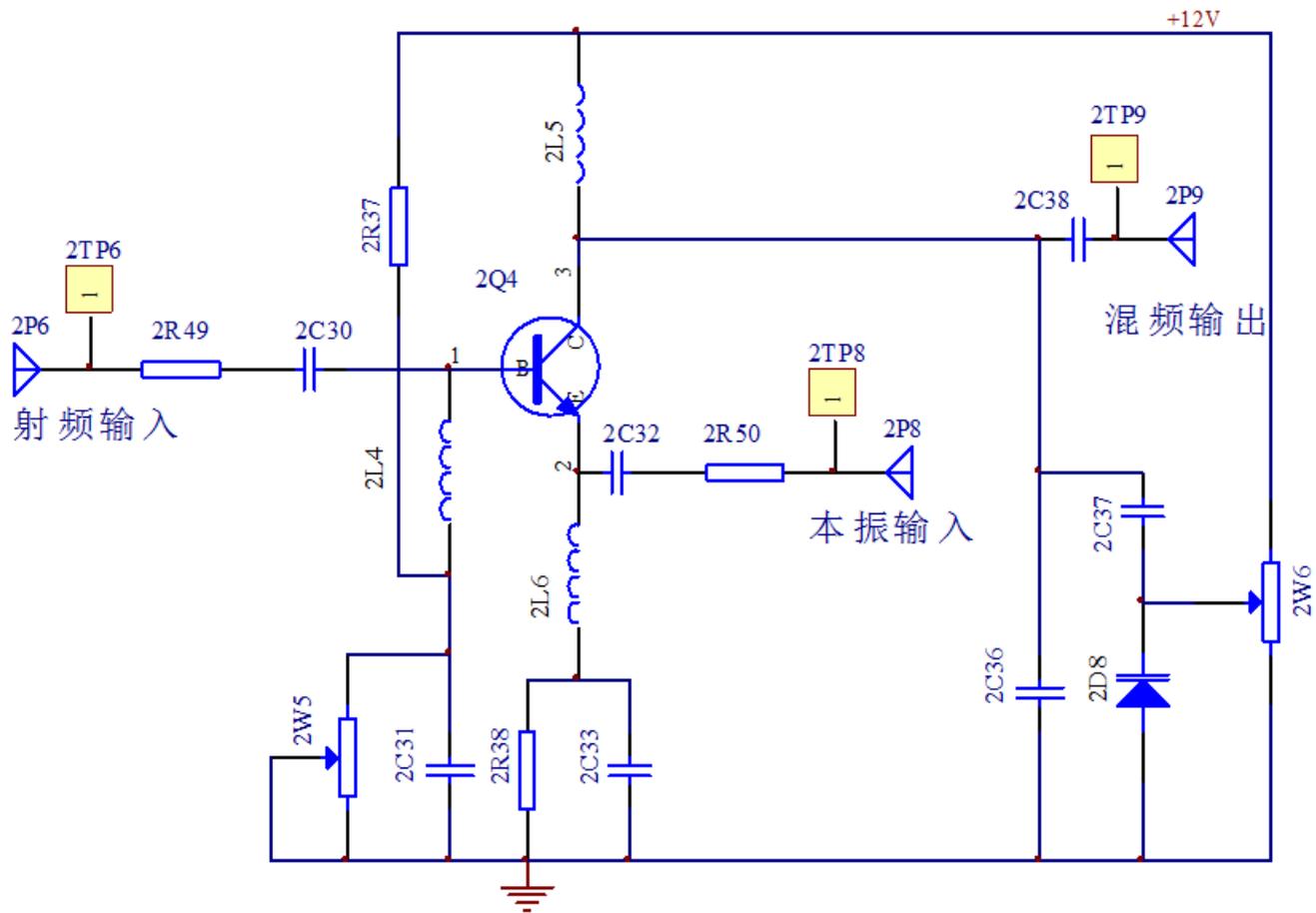


图 3-3 晶体三极管混频电路图

2. 用 MC1496 集成电路构成的混频器

图 3-4 是用 MC1496 集成电路构成的混频器，该电路图利用一片 1496 集成块构成两个实验电路，即幅度解调电路和混频电路，本节我们只讨论混频电路。MC1496 是一种四象限模拟相乘器（我们通常把它叫做乘法器），其内部电路在振幅调制一节中已作介绍。图中，6P4 为本振信号 U_L 输入口，本振信号经 6C6 从乘法器的一个输入端（10 脚）输入。6P5 为射频信号输入口，射频信号电压 U_s 从乘法器的另一个输入端（1 脚）输入，混频后的中频（ $f_i = f_L - f_s$ ）信号由乘法器输出端（12 脚）输出。输出端的带通滤波器由 6L2、6C12 和 6C13 组成，带通滤波器必须调谐在中频频率 f_i 上，本实验的中频频率为 2.5MHz。如果输入的射频信号频率为 $f_s = 6.3\text{MHz}$ ，则本振频率应为 $f_L = 8.8\text{MHz}$ ，中频 $f_i = f_L - f_s = 8.8 - 6.3\text{M} = 2.5\text{MHz}$ 。由于中频固定不变，当射频信号频率改变时，本振频率也应跟着改变。因为乘法器（12 脚）输出的频率成分很多，经带通滤波器滤波后，只选出我们所需要的中频 2.5MHz，其它频率成分被滤波器滤除掉了。图中三极管 6Q2 为射极跟随器，它的作用是提高本级带负载的能力。带通滤波器选出的中频，经射极跟随器后由 6P7 输出，6TP7 为混频器输出测量点。

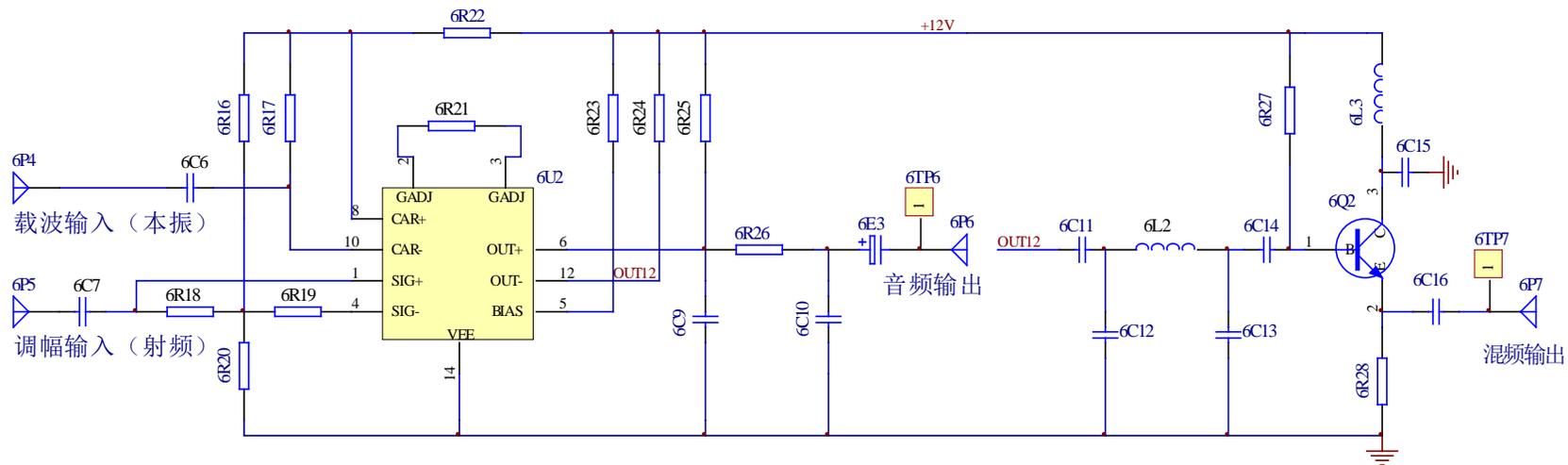


图 3-4 集成乘法器幅度解调及混频电路图

3-3 混频器的实验目的、内容和步骤

一. 实验目的

1. 掌握三极管混频器和集成混频器的基本工作原理,掌握用 MC1496 来实现混频的方法;
2. 了解混频器的寄生干扰。

二. 实验内容

1. 用示波器观察混频器输入输出波形;
2. 用频率计测量混频器输入输出频率;
3. 用示波器观察输入波形为调幅波时的输出波形。

三. 实验步骤

1. 实验准备

插装好正弦振荡器与晶体管混频模块以及乘法器调幅混频同步解调模块。接通实验箱电源,此时模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。点击显示屏,选择“实验系统”中的“高频原理实验”,然后再选择“混频器实验”中的“三极管混频实验”,显示屏会显示三极管混频器原理实验图。

2. 中频频率的观测

(1) 晶体三极管混频器

将 2P5 通过导线和 2P8 相连, LC 振荡器输出频率调节为 8.8MHz 左右或利用晶体振荡器输出 9.0MHz (幅度 V_{pp} 在 1.5V 左右) 作为本实验的本振信号输入混频器的一个输入端,混频器的另一个输入端 (2P6) 接高频信号发生器的输出 (6.3MHz $V_{pp} = 1V$, 若本振采用晶体振荡器, 高频信号发生器输出频率设置为 6.5MHz)。用示波器观测混频器输出 2TP9, 调整 2W5 和 2W6 使混频输出达到最大值。并用频率计或示波器测量 2P6、2P8、2P9 的频率。并计算各频率是否符合 $f_i = f_L - f_s$ 。当改变高频信号源的频率时, 输出中频 2TP9 的波形作何变化, 为什么?

(2) 集成乘法器混频器

将 2P5 通过导线和 6P4 相连, 将 LC 振荡器输出频率调整为 8.8MHz 左右, 或利用晶体振荡器输出 9.0MHz。幅度 $V_{pp} = 1.5V$ 左右, 作为本实验的本振信号, 送入乘法器的一个输入端。高频信号发生器输出频率调为 6.3MHz (若本振采用晶体振荡器, 高频信号发生器输出频率设置为 6.5MHz), 幅度峰-峰值 $V_{pp} = 1V$ 左右, 作为射频信号输入到乘法的另一个输入端 (6P5)。用示波器观测 6TP7 的波形, 用频率计测量 6P4、6P5、6P7 的频率, 并计算各频率是否符合 $f_i = f_L - f_s$ 。当改变高频信号源的频率时, 输出中频 6TP7 的波形作何变化, 为什么?

3. 射频信号为调幅波时混频的输出波形观测

我们通过集成乘法器调幅模块产生一个调幅波, 将高频信号源输出接 6P1, 低频信号源输出接 6P2, 将低频信号源频率设置为 1KHz, V_{pp} 设置为 2V 左右, 载波频率设置为 6.3MHz,

V_{pp} 设置为 300mv 左右。送入集成乘法器幅度调制实验，通过编码器（6SS1）调节 6W1 和 6W2，使之产生一个调幅信号，作为本实验的射频输入，本振信号频率仍为 8.8MHZ，用示波器分别观察晶体三极管混频器和集成乘法器混频器输入输出各点波形，特别注意观察晶体三极管 2TP6 和 2TP9 以及集成乘法器混频 6P5 和 6TP7 两点波形的包络是否一致。

四. 实验报告

1. 根据观测结果，绘制所测各点波形图，并作分析。
2. 归纳并总结信号混频的过程。

实验 4 中频放大器

4-1 中频放大器的基本工作原理

中频放大器位于混频之后，检波之前，是专门对固定中频信号进行放大的，中放和高放都是谐振放大器，它们有许多共同点，由于中频放大器的工作频率是固定的，而且频率一般都较低，因而有其特殊之处。

一. 中频放大器的作用

1. 进一步放大信号

接收机的增益，主要是中频放大器的增益。由于中放工作频率较低，因而容易获得较高而又稳定的增益。

2. 进一步选择信号，抑制邻道干扰

接收机的选择性主要由中放的选择性来保证，因为高放及输入回路工作频率较高，因而通带较宽，中放工作频率较低，且为固定，因而可采用较复杂的谐振回路或带通滤波器，将通带做的较窄，使谐振曲线接近于理想矩形，所以中放的选择性好，对邻道干扰有较强的抑制。

二. 对中频放大器的要求

1. 增益要高，一般都采用多级中频放大器。

2. 工作要稳定，不允许出现自激。

3. 选择性要好，对有用信号应能不失真地通过，对无用信号和干扰应有很大的抑制。

三. 中频放大器的分类及工作过程

中频放大器按照负载回路的构成可分为单调谐中频放大器和双调谐中频放大器，按照三极管的接法可分为共发射极、共基极和共集电极等中频放大器。

中频放大器的工作过程与高频放大器相同，它们都是小信号放大器，工作在甲类（A类）状态，它们都采用谐振回路作负载，不再重复。

4-2 中频放大器的实验电路

图 4-1 是中频放大器实验电路图。从图可看出，本实验电路采用两级中频放大器，而且都是共发放大，这样可以获得较大的增益。图中 5P1 为中频信号输入口，5TP1 为输入信号测试点。5L2、5L3、5C5 和变容管 5D2 构成第一级谐振回路，5L9、5C16A 组成第二级谐振回路，其谐振频率为 2.5MHZ，图中 5W1 用来调整变容管的偏压，从而调整其谐振频率。

5W2 用来调整中频放大输出幅度。5P5 为中频输出口，5P2 为自动增益控制（AGC）连接孔。

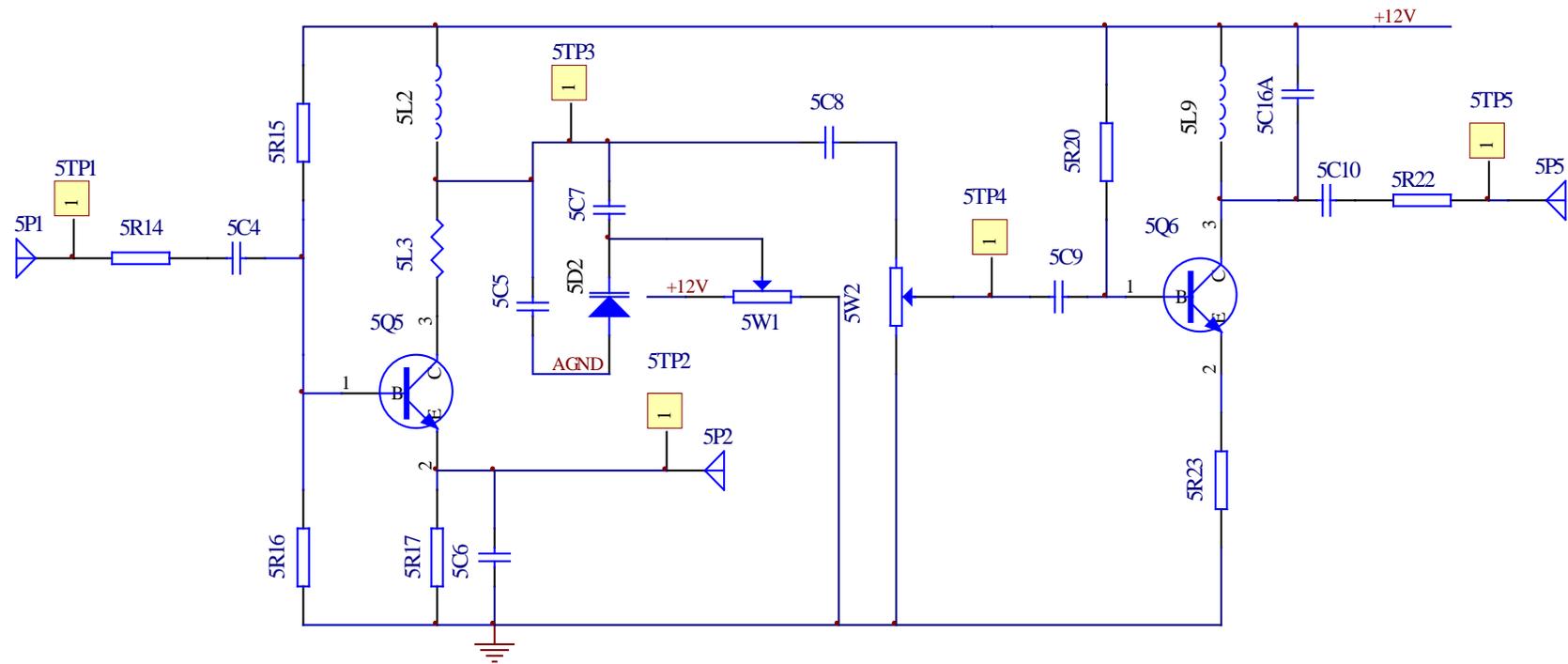


图 4-1 中频放大器实验原理图

4-3 中频放大器的实验目的、内容和步骤

一. 实验目的

1. 熟悉电子元件和高频电子线路实验系统;
2. 了解中频放大器的作用、要求及工作原理;
3. 掌握中频放大器的测试方法。

二. 实验内容

1. 用示波器观察中频放大器输入输出波形, 并计算其放大倍数。
2. 用点测法测出中频放大器幅频特性, 并画出特性曲线, 计算出中频放大器的通频带。

三. 实验步骤

1. 实验准备

插装好中放 AGC 与二极管检波模块, 打开实验箱电源, 此时模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。点击显示屏, 选择“实验系统”中的“高频原理实验”, 然后再选择“中频放大器实验”, 显示屏会显示中频放大器原理实验图, 图中的可调元件可通过点击和旋转模块右下角编码器 5SS1 进行调节。

2. 中频放大器输入输出波形观察及放大倍数测量

点击显示屏原理图上方的“高频信号源”, 设置高频信号源频率为 2.5MHZ, 把幅度调到 7 左右, 对应的幅度峰-峰值 $V_{pp} < 100\text{mv}$ 左右的幅度, 其高频信号源输出送入中频放大器的输入端 (5P1), 用示波器测量中放输出 5P5 点的波形, 点击电位器 5W1, 旋转编码器 (5SS1), 使示波器观测到的波形幅度为最大, 此时中放输出幅度最大。调整 5W2, 使中放输出幅度最大且不失真, 并记下此时的幅度大小, 然后再测量中放此时的输入幅度, 即可算出中放的电压放大倍数。

3. 测量中频放大器的谐振曲线(幅频特性)

(1) 点测法

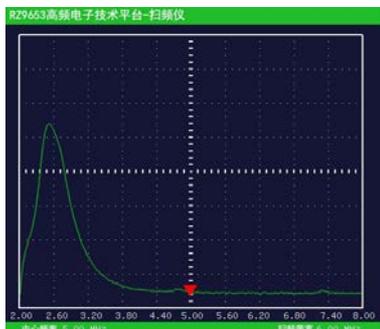
保持上述状态不变, 按照表 4-1 改变高频信号源的频率, 保持高频信号源输出幅度为 100mV (示波器 CH1 监视), 从示波器 CH2 (接 5P5) 上读出与频率相对应的幅值, 并把数据填入表 4-1, 然后以横轴为频率, 纵轴为幅度, 按照表 4-1, 画出中频放大器的幅频特性曲线。并从曲线上算出中频放大器的通频带 (幅度最大值下降到 0.707 时所对应的频率范围为通频带)。

表 4-1

频率 (MHZ)	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
输出幅度 U(mv)											

(2) 扫频法

用本实验箱上的扫频仪测试谐振曲线。在显示屏上选择扫频仪，扫频仪起始频率设置为 1.5MHZ, 高频信号源(此时为扫频信号源)接中放输入(5P1),“扫频仪”与中放输出(5P5)相连。此时显示屏上显示中频放大器的谐振曲线，调整中放电位器 5W1 和 5W2，谐振曲线会有变化。用扫频仪测出的曲线如下图。



4. 输入信号为调幅波的观察

在上述状态下，将输入信号设置为调幅波（同混频器调幅波设置一样），其载波为 2.5MHZ。用示波器观察中放输出 5P5 点的波形是否为调幅波。

四. 实验报告要求

1. 根据实验数据计算出中频放大器的放大倍数。
2. 根据实验数据绘制中频放大器幅频特性曲线，并算出通频带。
3. 总结本实验所获得的体会。

实验 5 振幅调制（集成乘法器幅度调制电路）

5-1 振幅调制的基本工作原理

根据电磁波理论知道，只有频率较高的振荡才能被天线有效地辐射。但是人的讲话声音转换为相应电信号的频率较低，不适于直接从天线上辐射。因此，为了传递信息，就必须将要传递的信息“记载”到高频振荡上去。这一“记载”过程称为调制。调制后的高频振荡称为已调波，未调制的高频振荡称为载波。需要“记载”的信息称为调制信号。

调制过程是用被传递的低频信号去控制高频振荡信号，使高频输出信号的参数（幅度、频率、相位）相应于低频信号变化而变化，从而实现低频信号搬移到高频段，被高频信号携带传播的目的。完成调制过程的装置叫调制器。

调制器和解调器必须由非线性元件构成，它们可以是二极管或三极管。近年来集成电路在模拟通信中得到了广泛应用，调制器、解调器都可以用模拟乘法器来实现。

一. 振幅调制和调幅波

振幅调制就是用低频调制信号去控制高频载波信号的振幅，使载波的振幅随调制信号成正比地变化。经过振幅调制的高频载波称为振幅调制波（简称调幅波）。调幅波有普通调幅波（AM）、抑制载波的双边带调幅波（DSB）和抑制载波的单边带调幅波（SSB）三种。

1. 普通调幅波（AM）

（1）调幅波的表达式、波形

设调制信号为单一频率的余弦波：

$$u_{\Omega}(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega t = U_{\Omega m} \cos 2\pi Ft \quad (5-1)$$

载波信号为

$$u_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t = U_{cm} \cos 2\pi f_c t \quad (5-2)$$

为了简化分析，设两者波形的初相角均为零，因为调幅波的振幅和调制信号成正比，由此可得调幅波的振幅为

$$\begin{aligned} U_{AM}(t) &= U_{cm} + k_a U_{\Omega m} \cos \Omega t \\ &= U_{cm} \left(1 + k_a \frac{U_{\Omega m}}{U_{cm}} \cos \Omega t \right) \\ &= U_{cm} (1 + m_a \cos \Omega t) \end{aligned} \quad (5-3)$$

式中，

$$m_a = k_a \frac{U_{\Omega m}}{U_{cm}}$$

其中， m_a 称为调幅指数或调幅度，它表示载波振幅受调制信号控制程度， k_a 为由调

制电路决定的比例常数。由于实现振幅调制后载波频率保持不变，因此已调波的表示式为

$$U_{AM}(t) = U_{AM}(t) \cos \omega_c t = U_{cm}(1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_c t \quad (5-4)$$

可见，调幅波也是一个高频振荡，而它的振幅变化规律（即包络变化）是与调制信号完全一致的，因此调幅波携带着原调制信号的信息。由于调幅指数 m_a 与调制电压的振幅成正比，即 $U_{\Omega m}$ 越大， m_a 越大，调幅波幅度变化越大， m_a 小于或等于 1。如果 $m_a > 1$ ，调幅波产生失真，这种情况称为过调幅，在实际工作中应该避免产生过调幅。调幅波的波形如图 5-1 所示。

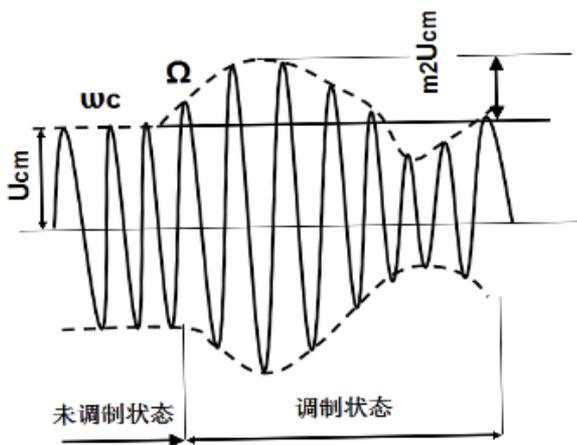


图 5-1 调幅波的波形

(2) 调幅波的频谱

由式 (5-4) 展开得

$$U_{AM}(t) = U_{cm}(t) \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m_a U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} m_a U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t \quad (5-5)$$

可见，用单音频信号调制后的已调波，由三个高频分量组成，除角频率为 ω_c 的载波以外，还有 $(\omega_c + \Omega)$ 和 $(\omega_c - \Omega)$ 两个新角频率分量。其中一个比 ω_c 高，称为上边频分量；一个比 ω_c 低，称为下边频分量。载波频率分量的振幅仍为 U_{cm} ，而两个边频分量的振幅均为 $\frac{1}{2} m_a U_{cm}$ 。因为 m_a 的最大值只能等于 1，所以边频振幅的最大值不能超过 $\frac{1}{2} U_{cm}$ ，将这三个频率分量用图画出，便可得到图 5-2 所示的频谱图。在这个图上，调幅波的每一个正弦分量用一个线段表示，线段的长度代表其幅度，线段在横轴上的位置代表其频率。

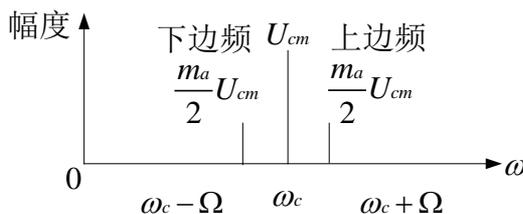


图 5-2 普通调幅波的频谱图

以上分析表明，调幅的过程就是在频谱上将低频调制信号搬移到高频载波分量两侧的过程。

显然，在调幅波中，载波并不含有任何有用信息，要传送的信息只包含于边频分量中。边频的振幅反映了调制信号幅度的大小，边频的频谱虽属于高频范畴，但反映了调制信号频率的高低。

由图 5-2 可见，在单频调制时，其调幅波的频带宽度为调制信号频谱的两倍，即 $B = 2F$ 。实际上调制信号不是单一频率的正弦波，而是包含若干频率分量的复杂波形（例如实际的话音信号就很复杂），在多频调制时，如由若干个不同频率 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_k$ 的信号所调制，其调幅波方程为

$$u_{AM}(t) = U_{cm}(1 + m_{a1} \cos \Omega_1 t + m_{a2} \cos \Omega_2 t + \dots) \cos \omega_c t$$

(5-6)

相乘展开后得到

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) = & U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{m_{a1}}{2} U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega_1)t + \frac{m_{a1}}{2} U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega_1)t \\ & + \frac{m_{a2}}{2} U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega_2)t + \frac{m_{a2}}{2} U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega_2)t + \dots \\ & + \frac{m_{ak}}{2} U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega_k)t + \frac{m_{ak}}{2} U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega_k)t \end{aligned}$$

(5-7)

相应地，其调幅波含有一个载频分量及一系列的高低边频分量 $(\omega_c \pm \Omega_1)$ ， $(\omega_c \pm \Omega_2)$ ， $\dots(\omega_c \pm \Omega_k)$ 等等。多频调制调幅波的频谱图如图 5-3 所示。由此可以看出，一个调幅波实际上是占有某一个频率范围，这个范围称为频带。总的频带宽度为最高调制频率的两倍，即 $B = 2F_{\max}$ ，这个结论很重要。因为在接收和发送调幅波的通信设备中，所有选频网络应当不但能通过载频，而且还要能通过边频成分。如果选频网络的通频带太窄，将导致调幅波的失真。

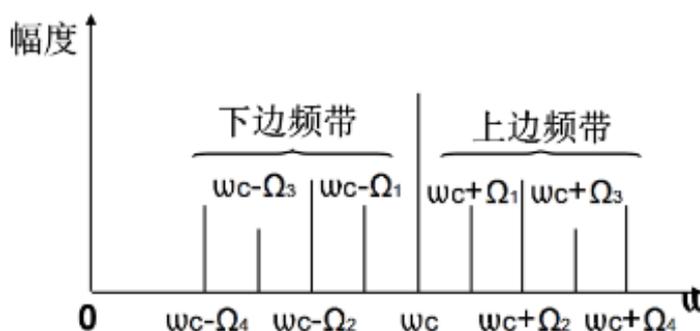


图 5-3 多频调制调幅波的频谱图

调制后调制信号的频谱被线性地搬移到载频的两边，成为调幅波上、下边带。所以，调幅的过程实质上是一种频谱搬移的过程。

2. 抑制载波双边带调幅 (DSB)

由于载波不携带信息，因此，为了节省发射功率，可以只发射含有信息的上、下两个

边带，而不发射载波，这种调制方式称为抑制载波的双边带调幅，简称双边带调幅，用 DSB 表示。可将调制信号 u_{Ω} 和载波信号 u_c 直接加到乘法器或平衡调幅器电路得到。双边带调幅信号写为

$$\begin{aligned}
 u_{DSB}(t) &= Au_{\Omega}u_c = AU_{\Omega m} \cos \Omega t U_{cm} \cos \omega c t \\
 &= \frac{1}{2} AU_{\Omega m} U_{cm} [\cos(\omega c + \Omega)t + \cos(\omega c - \Omega)t]
 \end{aligned}
 \tag{5-8}$$

式 (5-8) 中， A 为由调幅电路决定的系数； $AU_{\Omega m}U_{cm} \cos \Omega t$ 是双边带高频信号的振幅，它与调制信号成正比。高频信号的振幅按调制信号的规律变化，不是在 U_{cm} 的基础上，而是在零值的基础上变化，可正可负。因此，当调制信号从正半周进入负半周的瞬间（即调幅包络线过零点时），相应高频振荡的相位发生 180° 的突变。双边带调幅的调制信号、调幅波如图 5-4 所示。由图可见，双边带调幅波的包络已不再反映调制信号的变化规律。

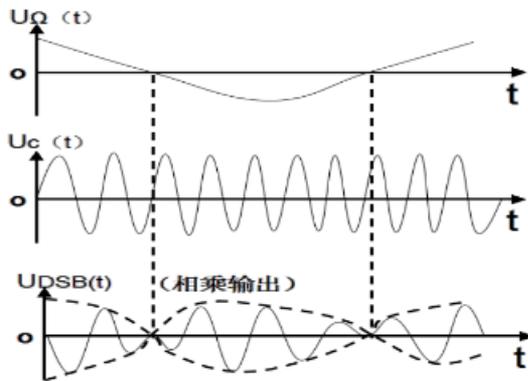


图 5-4 双边带调幅的调制信号及调幅波

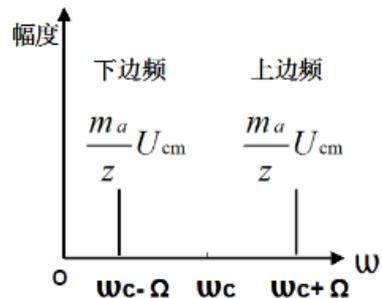


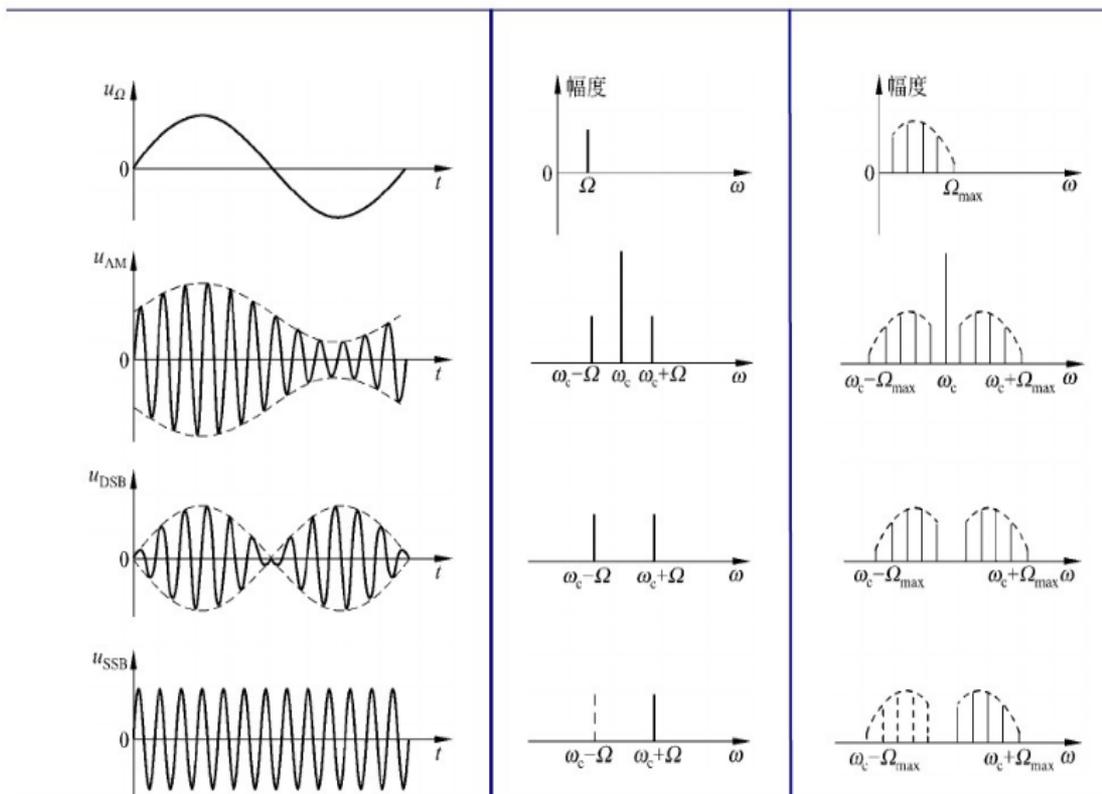
图 5-5 DSB 的频谱图

由以上讨论可以看出 DSB 调制信号有如下特点：

- (1) DSB 信号的幅值仍随调制信号而变化，但与普通调幅波不同，DSB 的包络不再反映调制信号的形状，仍保持调幅波频谱搬移的特征。
- (2) 在调制信号的正负半周，载波的相位反相，即高频振荡的相位在 $f(t) = 0$ 瞬间有 180° 的突变。
- (3) 对 DSB 调制，信号仍集中在载频 ωc 附近，所占频带为

$$B_{DSB} = 2F_{\max}$$

表 5-1 三种调幅波时域、频域波形



二. 普通调幅波的产生电路

在无线电发射机中，振幅调制的方法按功率电平的高低分为高电平调制电路和低电平调制电路两大类。前者是在发射机的最后一级直接产生达到输出功率要求的已调波，后者多在发射机的前级产生小功率的已调波，再经过线性功率放大器放大，达到所需的发射功率电平。

普通调幅波的产生多用高电平调制电路。它的优点是不需要采用效率低的线性放大器，有利于提高整机效率。但它必须兼顾输出功率、效率和调制线性的要求。低电平调制电路的优点是调幅器的功率小，电路简单。由于它输出功率小，常用在双边带调制和低电平输出系统。低电平调幅电路可采用集成高频放大器产生调幅波，也可利用模拟乘法器产生调幅波。

下面介绍一种高电平调幅电路。高电平调幅电路是以调谐功率放大器为基础构成的，实际上它是一个输出电压振幅受调制信号控制的调谐功率放大器，根据调制信号注入调幅器方式的不同，分为基极调幅、发射极调幅和集电极调幅三种，下面我们仅介绍基极调幅。

基极调幅电路如图 5-6 所示。由图可见，高频载波信号 u_{ω} 通过高频变压器 T_1 加到晶体管基极回路，低频调制信号 u_{Ω} 通过低频变压器 T_2 加到晶体管基极回路， C_b 为高频旁路电容，用来为载波信号提供通路。

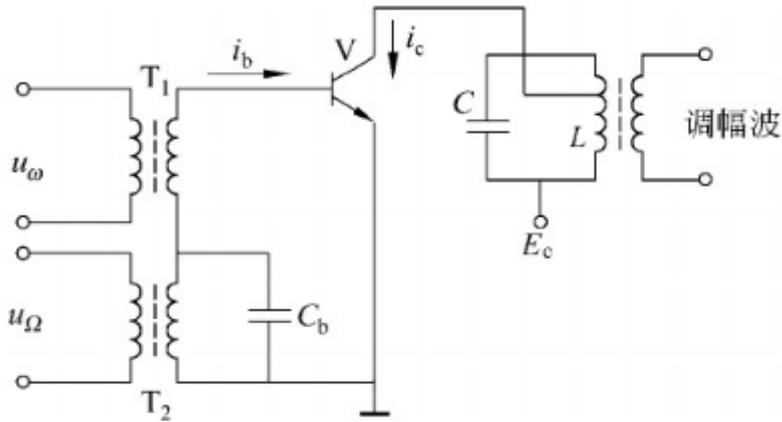


图 5-6 基极调幅电路

在调制过程中，调制信号 u_Ω 相当于一个缓慢变化的偏压（因为反偏压 $E_b = 0$ ，否则综合偏压应是 $E_b + u_\Omega$ ），使放大器的集电极脉冲电流的最大值 $i_{c\max}$ 和导通角 θ 按调制信号的大小而变化。在 u_Ω 往正向增大时， $i_{c\max}$ 和 θ 增大；在 u_Ω 往反向减小时， $i_{c\max}$ 和 θ 减少，故输出电压幅值正好反映调制信号波形。晶体管的集电极电流 i_c 波形和调谐回路输出的电压波形，如图 5-7 所示，将集电极谐振回路调谐在载频 f_c 上，那么放大器的输出端便获得调幅波。

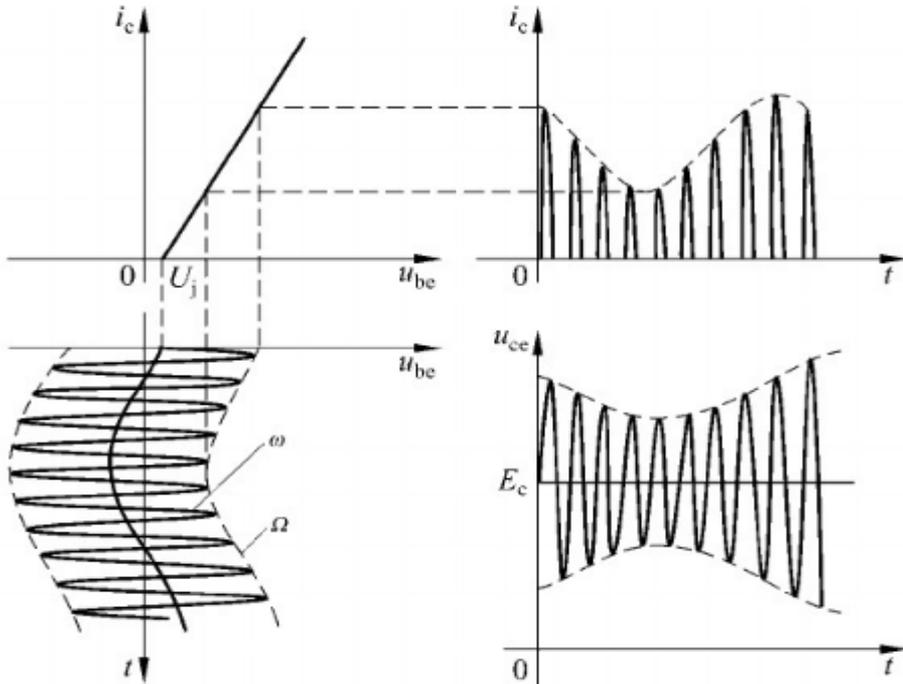


图 5-7 基极调幅波形图

三. 抑制载波调幅的产生电路

产生抑制载波调幅波的电路采用平衡、抵消的办法把载波抑制掉，故这种电路叫抑制载波调幅电路或叫平衡调幅电路。

实现这种调幅的电路很多，目前广泛应用的是二极管环形调制器，电路如图 5-8 所示。

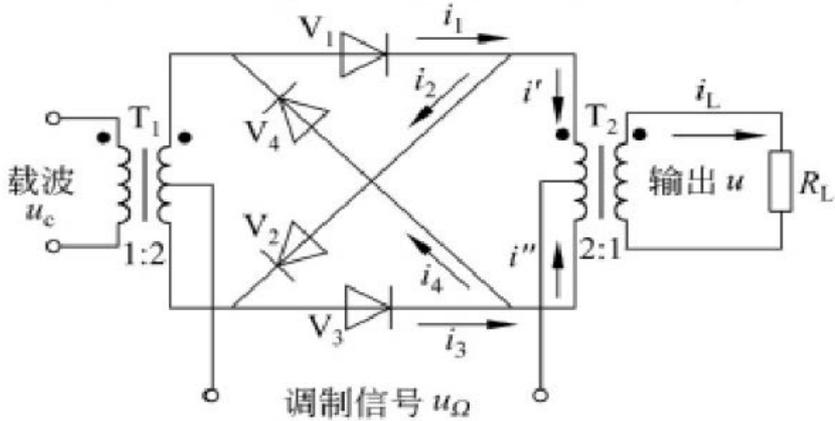


图 5-8 二极管环形调制器

随着集成电路的发展，由线性组件构成的平衡调幅器已被采用，图 5-9 是用模拟乘法器实现抑制载波的实际电路，它是用 MC1596G 构成。这个电路的特点是工作频带宽，输出频率较纯，而且省去了变压器，调整简单。

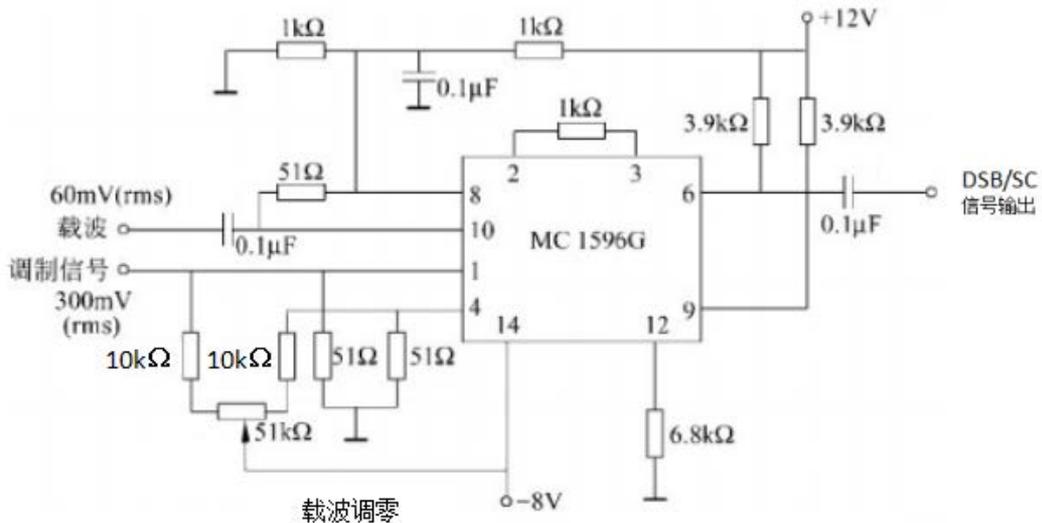


图 5-9 用模拟乘法器产生抑制载波调幅

5-2 振幅调制实验电路

由于集成电路的发展，集成模拟相乘器得到广泛的应用，本实验采用 MC1496 集成模拟相乘器来实现调幅之功能。

1. MC1496 简介

MC1496 是一种四象限模拟相乘器，其内部电路以及用作振幅调制器时的外部连接如图 5-10 所示。由图可见，电路中采用了以反极性方式连接的两组差分对（ $T_1 \sim T_4$ ），且这两组差分对的恒流源管（ T_5 、 T_6 ）又组成了一个差分对，因而亦称为双差分对模拟相乘器。其典型用法是：

(8)、(10)脚间接一路输入（称为上输入 v_1 ），(1)、(4)脚间接另一路输入（称为下输入 v_2 ），(6)、(12)脚分别经由集电极电阻 R_c 接到正电源+12V 上，并从(6)、(12)脚间取输出 v_o 。

(2)、(3)脚间接负反馈电阻 R_f 。(5)脚到地之间接电阻 R_B ，它决定了恒流源电流 I_7 、 I_8 的数值，典型值为 $6.8k\Omega$ 。(14)脚接负电源-8V。(7)、(9)、(11)、(13)脚悬空不用。由于两路输入 v_1 、 v_2 的极性皆可取正或负，因而称之为四象限模拟相乘器。可以证明：

$$v_o = \frac{2R_c}{R_f} v_2 \cdot \text{th} \left(\frac{v_1}{2v_T} \right),$$

因而，仅当上输入满足 $v_1 \leq v_T$ (26mV) 时，方有： $v_o = \frac{R_c}{R_f v_T} v_1 \cdot v_2$ ，才是真正的模拟相乘器。

本实验即为此例。

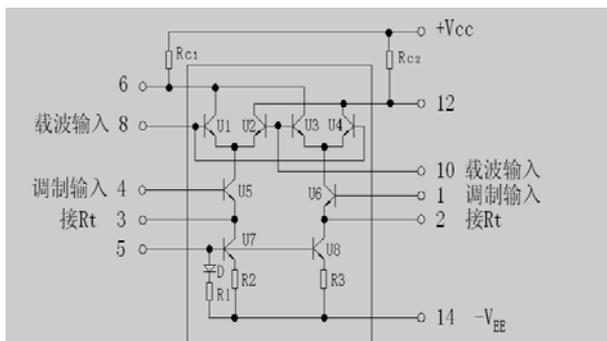


图 5-10 MC1496 内部电路及外部连接

2. MC1496 组成的调幅器实验电路

用 1496 组成的调幅器实验电路如图 5-11 所示。图中 6P1 为载波输入口，6TP1 为其测量点。6P2 为高频输入口，6TP2 为测量点。6W1 用来调整接入 1496 芯片 1 脚的直流电压，当一脚直流电压为零时，其输出为双边带调幅波(DSB)，当 1 脚加有直流电压时，其输出为普通调幅波 (AM)。调整 6W1 电位器，可以调整调幅波的调制度。图中 6Q1 为射极跟随器，对调幅信号进行放大，且提高带负载能力。图中 6W2 用以调整射随器的工作点电压。调幅信号经射随后由 6P3 输出，6TP3 为其测量点。

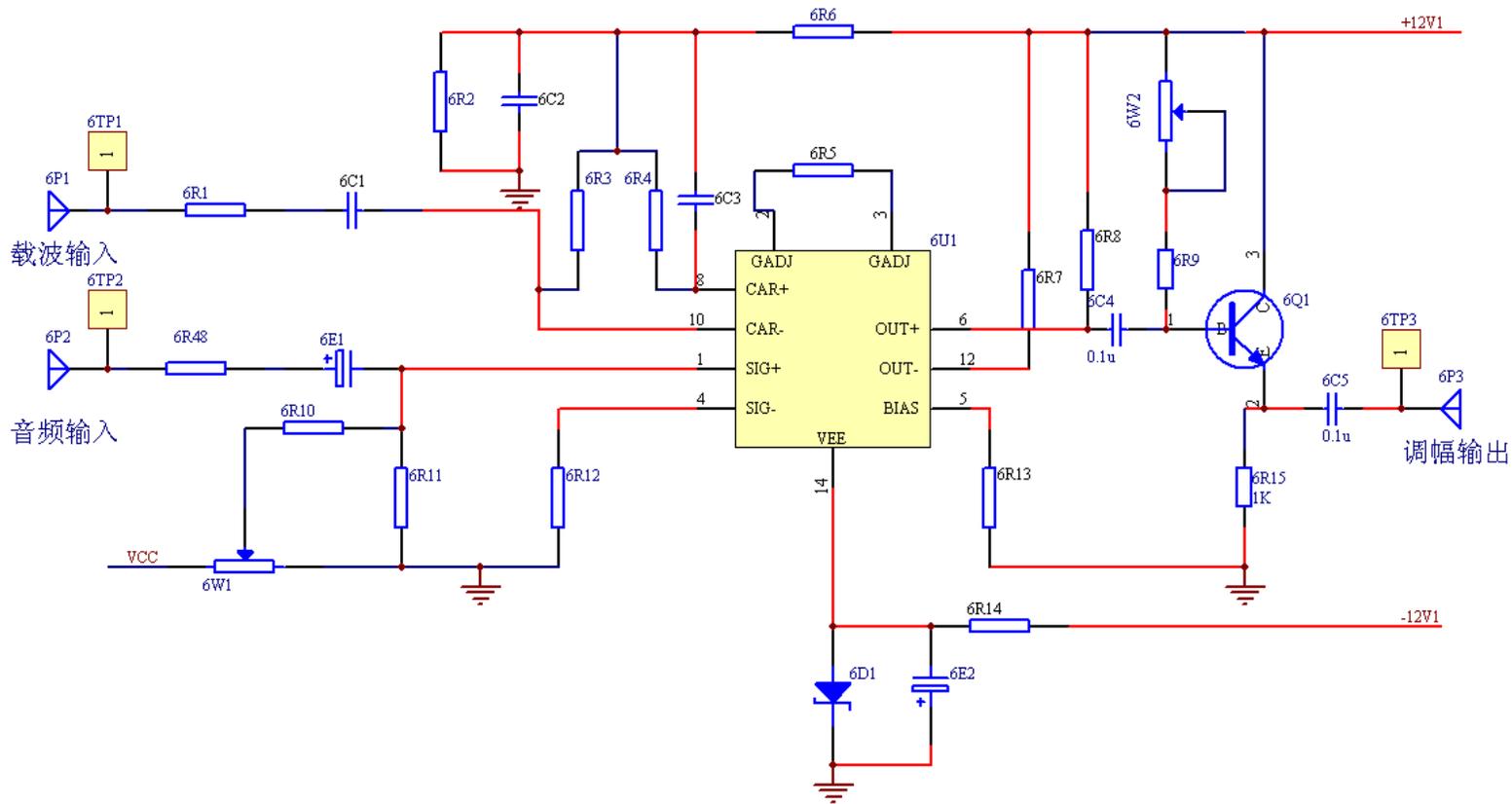


图 5-11 1496 组成的调幅器实验电路

5-3 振幅调制实验目的、内容和步骤

一、实验目的

1. 通过实验了解振幅调制的工作原理。
2. 掌握用 MC1496 来实现 AM 和 DSB 的方法，并研究已调波与调制信号，载波之间的关系。
3. 掌握用示波器测量调幅系数的方法。

二、实验内容

1. 用示波器观察正常调幅波（AM）波形，并测量其调幅系数。
2. 用示波器观察平衡调幅波（抑制载波的双边带波形 DSB）波形。
3. 用示波器观察调制信号为方波、三角波的调幅波。

三、实验步骤

1. 实验准备

（1）插装好集成乘法器调幅，混频与同步解调模块，接通实验箱电源，模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。

（2）调制信号源：采用实验箱上的低频信号源，其参数调节如下（示波器监测）：

- 频率范围：1kHz
- 波形选择：正弦波
- 输出峰-峰值：4V

（3）载波源：采用实验箱上的高频信号源：

- 工作频率：2.1MHz（也可采用其它频率）；
- 输出幅度（峰-峰值）：200mV 左右，幅度指示在 30 左右，用示波器观测。

2. DSB（抑制载波双边带调幅）波形观察

点击显示屏，选择“实验系统”中“高频原理实验”，然后再选择“振幅调制与解调实验”中的“集成乘法器幅度调制实验”，显示屏上会显示集成乘法器调幅的原理实验电路，图中的可调电位器可通过点击该元件和旋转模块右下角编码器（6SS1）来调整。

（1）DSB 信号波形观察

将高频信号源输出的载波接入载波输入端（6P1），低频调制信号接入音频输入端（6P2）。

示波器 CH1 接调制信号 6P2，示波器 CH2 接调幅输出端（6TP3），调整 6W1 即可观察到调制信号及其对应的 DSB 信号波形。其波形如图 5-12 所示，如果观察到的 DSB 波形不对称，应微调 6W1 电位器。

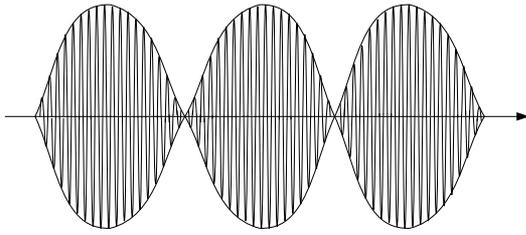


图 5-12

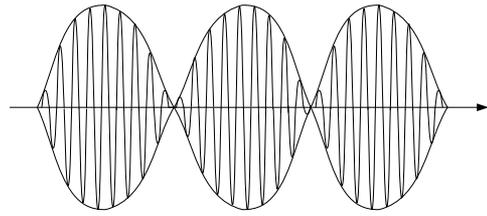


图 5-13

(2) DSB 信号反相点观察

为了清楚地观察双边带信号过零点的反相，必须降低载波的频率。本实验可将载波频率降低为 100KHZ，幅度仍为 200mv。调制信号仍为 1KHZ（幅度峰-峰值 4V）。

增大示波器 X 轴扫描速率，仔细观察调制信号过零点时刻所对应的 DSB 信号，过零点时刻的波形应该反相，如图 5-13 所示。

(3) DSB 信号波形与载波波形的相位比较

在上述实验的基础上，把调制器的输入载波波形与输出 DSB 波形的相位进行比较，可发现：在调制信号正半周期间，两者同相；在调制信号负半周期间，两者反相。

3. AM（常规调幅）波形测量

(1) AM 正常波形观测

载波频率仍设置为 2.1MHZ（幅度 200mv 左右，幅度指示为 30），调制信号频率 1KHZ（幅度峰-峰值 4V）。示波器 CH1 接 6P2、CH2 接 6TP3，调整 6W1 即可观察到正常的 AM 波形，若波形底部有失真，调制 6W2，使波形不失真，如图 5-14 所示。

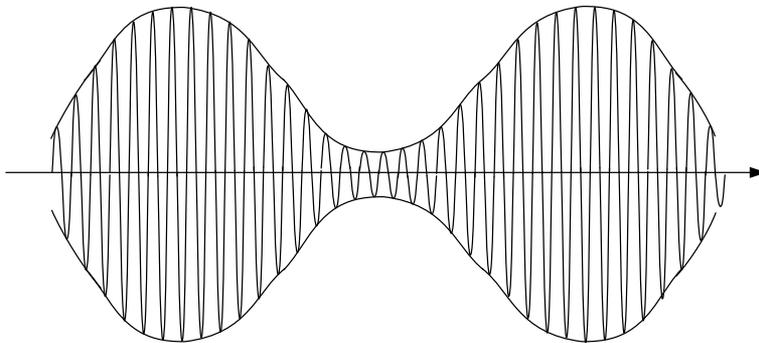
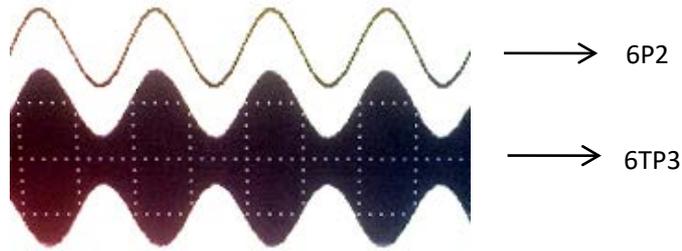


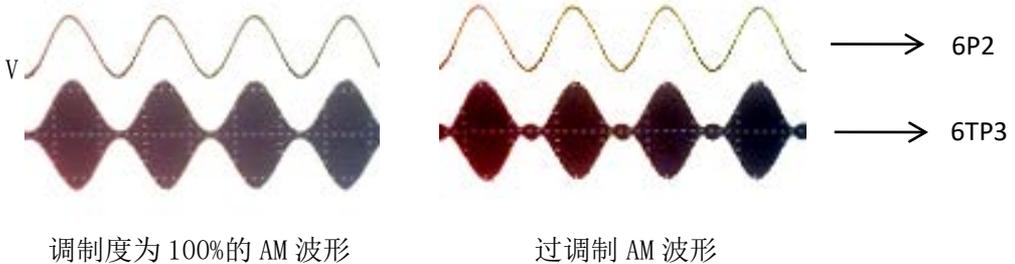
图 5-14

调整电位器 6W1 或改变调制信号幅度，可以改变调幅波的调制度。在观察输出波形时，改变音频调制信号的频率及幅度，输出波形应随之变化。下图为用示波器测出的正常调幅波波形：



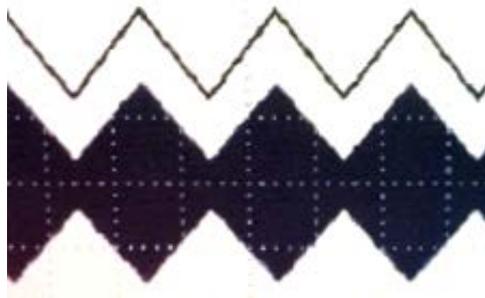
(2) 过调制时的 AM 波形观察

在上述实验的基础上，即载波 2.1MHz（幅度 200mv 左右，幅度指示为 30），音频调制信号 1KHz（幅度 4V），示波器 CH1 接 6P2、CH2 接 6TP3。调整 6W1 使调制度为 100%，然后增大音频调制信号的幅度，可以观察到过调制时 AM 波形，并与调制信号波形作比较。下图为调制度为 100%和过调制的 AM 波形：



(3) 调制信号为三角波和方波时的调幅波观察

保持载波源输出不变，但把调制信号源输出的调制信号改为三角波（峰—峰值 4V）或方波（4V），并改变其频率，观察已调波形的变化，调整 6W1，观察输出波形调制度的变化。下图为调制信号为三角波时的调幅波形：



4. 调制度 M_a 的测试

我们可以通过直接测量调制包络来测出 M_a 。将被测的调幅信号加到示波器 CH1 或 CH2，并使其同步。调节时间旋钮使荧光屏显示几个周期的调幅波波形，如图 5-15 所示。根据 M_a 的定义，测出 A、B，即可得到 M_a 。

$$m_a = \frac{A - B}{A + B} \times 100\%$$

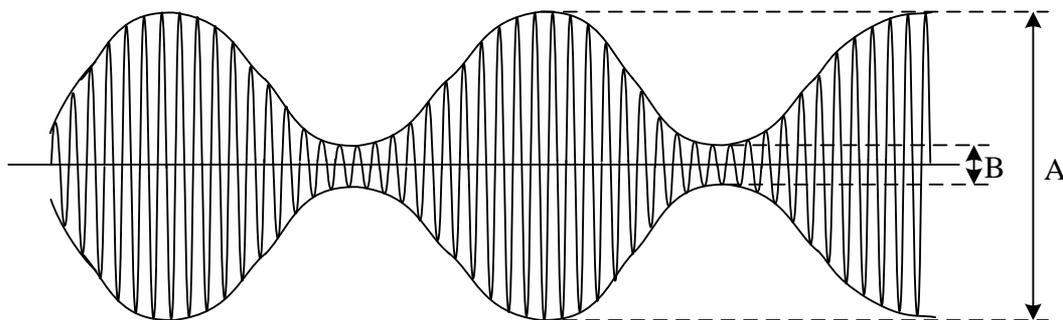


图 5-15

四. 实验报告要求

1. 整理按实验步骤所得数据，绘制记录的波形，并作出相应的结论。
2. 画出 DSB 波形和 $m_a = 100\%$ 时的 AM 波形，比较两者的区别。
3. 总结由本实验所获得的体会。

实验 6 振幅解调器（包络检波、同步检波）

6-1 振幅解调基本工作原理

解调过程是调制的反过程，即把低频信号从高频载波上搬移下来的过程。解调过程在收信端，实现解调的装置叫解调器。

一. 普通调幅波的解调

振幅调制的解调被称为检波，其作用是从调幅波中不失真地检出调制信号。由于普通调幅波的包络反映了调制信号的变化规律，因此常用非相干解调方法。非相干解调有两种方式，即小信号平方律检波和大信号包络检波。我们只介绍大信号包络检波器。

1. 大信号检波基本工作原理

大信号检波电路与小信号检波电路基本相同。由于大信号检波输入信号电压幅值一般在 500mV 以上，检波器的静态偏置就变得无关紧要了。下面以图 6-1 所示的简化电路为例进行分析。

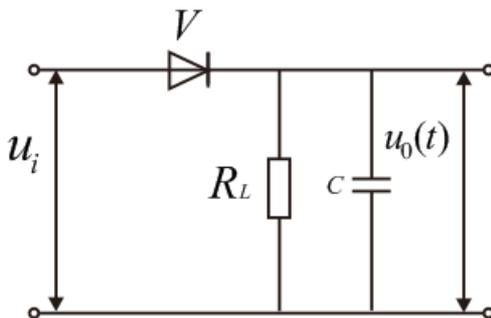


图 6-1 大信号检波电路

大信号检波和二极管整流的过程相同。图 6-2 表明了大信号检波的工作原理。输入信号 $u_i(t)$ 为正并超过 C 和 R_L 上的 $u_o(t)$ 时，二极管导通，信号通过二极管向 C 充电，此时 $u_o(t)$ 随充电电压上升而升高。当 $u_i(t)$ 下降且小于 $u_o(t)$ 时，二极管反向截止，此时停止向 C 充电， $u_o(t)$ 通过 R_L 放电， $u_o(t)$ 随放电而下降。

充电时，二极管的正向电阻 r_D 较小，充电较快。 $u_o(t)$ 以接近 $u_i(t)$ 的上升速率升高。放电时，因电阻 R_L 比 r_D 大得多（通常 $R_L = 5 \sim 10k\Omega$ ），放电慢，故 $u_o(t)$ 的波动小，并保证基本上接近于 $u_i(t)$ 的幅值。

如果 $u_i(t)$ 是高频等幅波，则 $u_o(t)$ 是大小为 U_o 的直流电压（忽略了少量的高频成分），这正是带有滤波电容的整流电路。

当输入信号 $u_i(t)$ 的幅度增大或减少时，检波器输出电压 $u_o(t)$ 也将随之近似成比例地升高或降低。当输入信号为调幅波时，检波器输出电压 $u_o(t)$ 就随着调幅波的包络线而变化，

从而获得调制信号,完成检波作用。由于输出电压 $u_o(t)$ 的大小与输入电压的峰值接近相等,故把这种检波器称为峰值包络检波器。

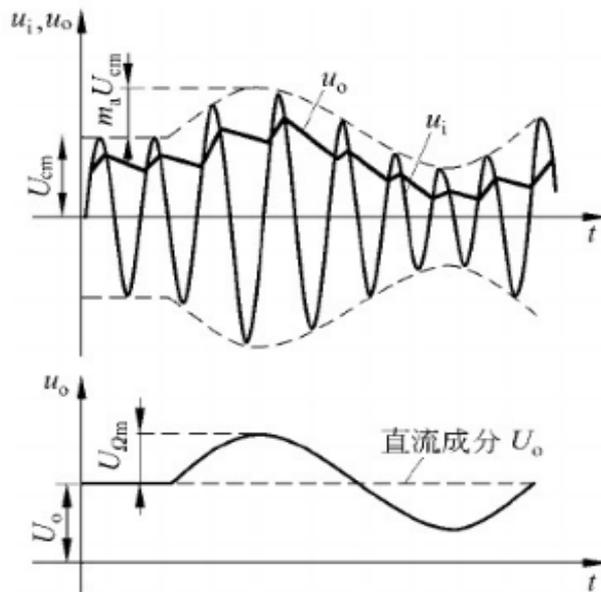


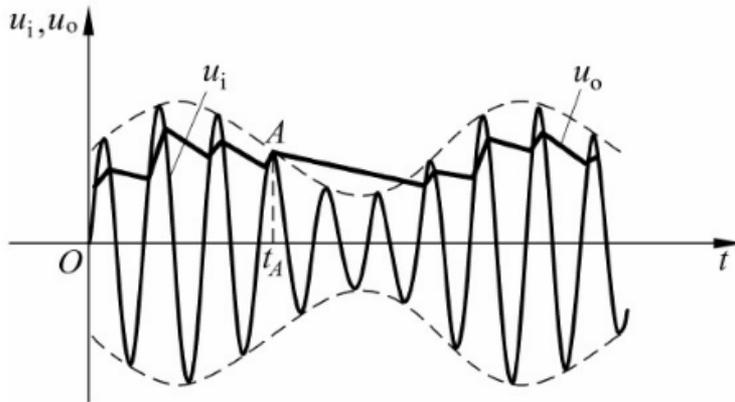
图 6-2 大信号检波原理

2. 检波失真

检波输出可能产生三种失真：第一种是由于检波二极管伏安特性弯曲引起的失真；第二种是由于滤波电容放电慢引起的失真，它叫对角线失真（又叫对角线切割失真）；第三种是由于输出耦合电容上所充的直流电压引起的失真，这种失真叫割底失真（又叫底部切割失真）。其中第一种失真主要存在于小信号检波器中，并且是小信号检波器中不可避免的失真，对于大信号检波器这种失真影响不大，主要是后两种失真，下面分别进行讨论。

(1) 对角线失真

参见图 6-1 所示的电路，在正常情况下，滤波电容 C 对高频每一周充放电一次，每次充到接近包络线的电压，使检波输出基本能跟上包络线的变化。它的放电规律是按指数曲线进行，时间常数为 $R_L C$ 。假设 $R_L C$ 很大，则放电很慢，可能在随后的若干高频周期内，包络线电压虽已下降，而 C 上的电压还大于包络线电压，这就使二极管反向截止，失去检波作用，直到包络线电压再次升到超过电容上的电压时，才恢复其检波功能。在二极管截止期间，检波输出波形是 C 的放电波形，呈倾斜的对角线形状，如图 6-3 所示，故叫对角线失真，也叫放电失真。非常明显，放电愈慢或包络线下降愈快，则愈易发生这种失真。



6-3 对角线失真原理图

(2) 割底失真

一般在接收机中，检波器输出耦合到下级的电容很大（5-10 μF ），图 6-4 中的 C_1 为耦合电容。

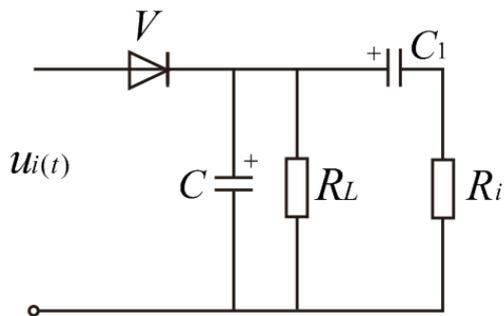


图 6-4

对检波器输出的直流而言， C_1 上充有一个直流电压 U_o 。如果输入信号 $u_i(t)$ 的调制度很深，以致在一部分时间内其幅值比 C_1 上电压 U_o 还小，则在此期间内，二极管将处于反向截止状态，产生失真。此时电容上电压等于 U_o ，故表现为输出波形中的底部被切去，如图 6-5 所示。

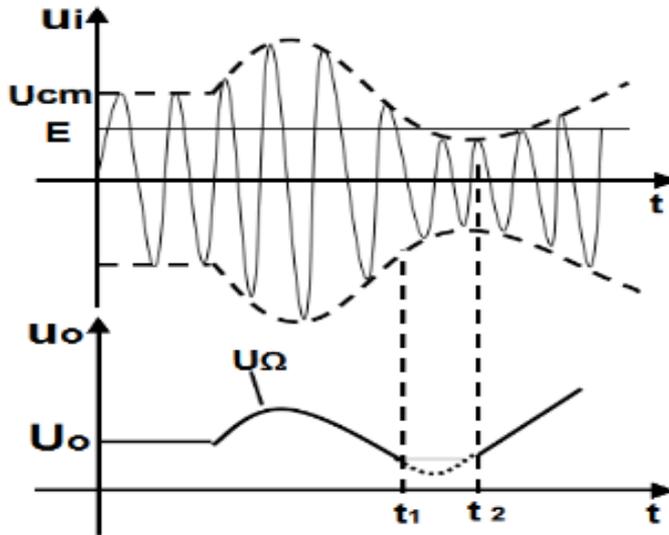


图 6-5 割底失真波形图

二. 抑制载波调幅波的解调电路

包络检波器只能解调普通调幅波，而不能解调 DSB 和 SSB 信号。这是由于后两种已调信号的包络并不反映调制信号的变化规律，因此，抑制载波调幅波的解调必须采用同步检波电路，最常用的是乘积型同步检波电路。

乘积型同步检波器的组成方框图如图 6-6 所示。它与普通包络检波器的区别就在于接收端必须提供一个本地载波信号 U_r ，而且要求它是与发端的载波信号同频、同相的同步信号。利用这个外加的本地载波信号 U_r 与接收端输入的调幅信号 U_i 两者相乘，可以产生原调制信号分量和其它谐波组合分量，经低通滤波器后，就可解调出原调制信号。

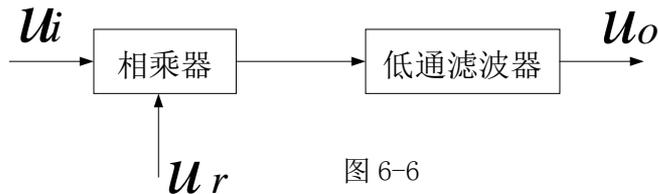


图 6-6

乘积检波电路可以利用二极管环形调制器来实现。环形调制器既可用作调幅又可用作解调。利用模拟乘法器构成的抑制载波调幅解调电路，如图 6-7 所示。

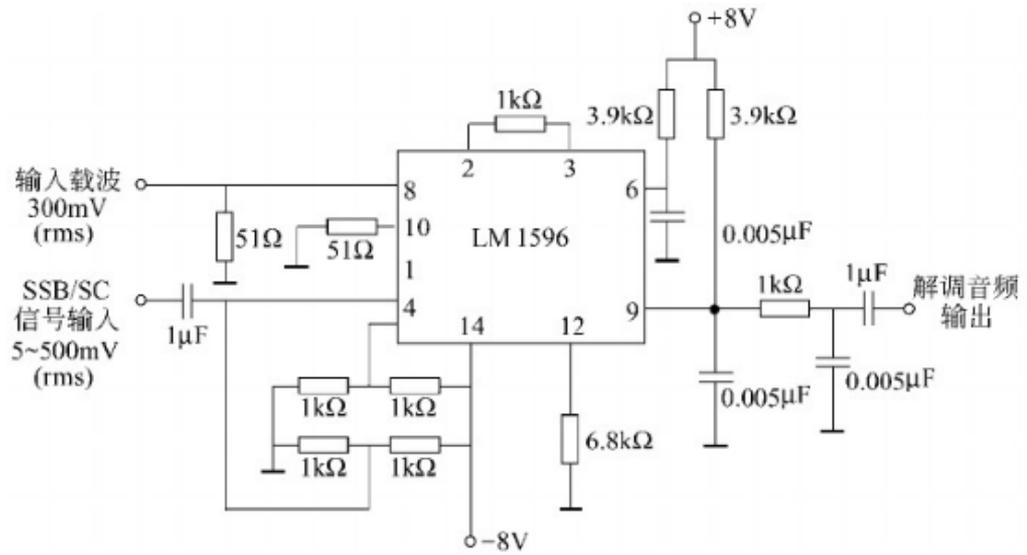


图 6-7 用模拟乘法器构成同步检波电路

6-2 振幅解调实验电路

1. 二极管包络检波

二极管包络检波器是包络检波器中最简单、最常用的一种电路。它适合于解调信号电平较大（俗称大信号，通常要求峰-峰值为 1.5V 以上）的 AM 波。它具有电路简单，检波线性好，易于实现等优点。本实验电路主要包括二极管、RC 低通滤波器和低频放大部分，实验电路如图 6-8 所示。

图中，5D1 为检波管，5C2、5R2、5C3 构成低通滤波器，5R3、5W3 为二极管检波直流负载，5W3 用来调节直流负载大小。图中 5Q1、5Q2 对检波后的音频进行放大，5W5 用来调整 5Q1 的工作点，也可用于改变检波的交流负载。放大后音频信号由 5P9 输出，调节 5W4 可调整输出幅度。图中，利用二极管的单向导电性使得电路的充放电时间常数不同（实际上，相差很大）来实现检波，所以 RC 时间常数的选择很重要。RC 时间常数过大，则会产生对角切割失真（又称惰性失真）。RC 常数太小，高频分量会滤不干净。综合考虑要求满足下式：

$$RC\Omega \ll \frac{\sqrt{1-m_a^2}}{m_a}$$

其中： m_a 为调幅系数， Ω 为调制信号角频率。

当检波器的直流负载电阻 R 与交流音频负载电阻 R_Ω 不相等，而且调幅度 m_a 又相当大时会产生底边切割失真（又称负峰切割失真），为了保证不产生底边切割失真应满足

$$m_a < \frac{R_\Omega}{R}。$$

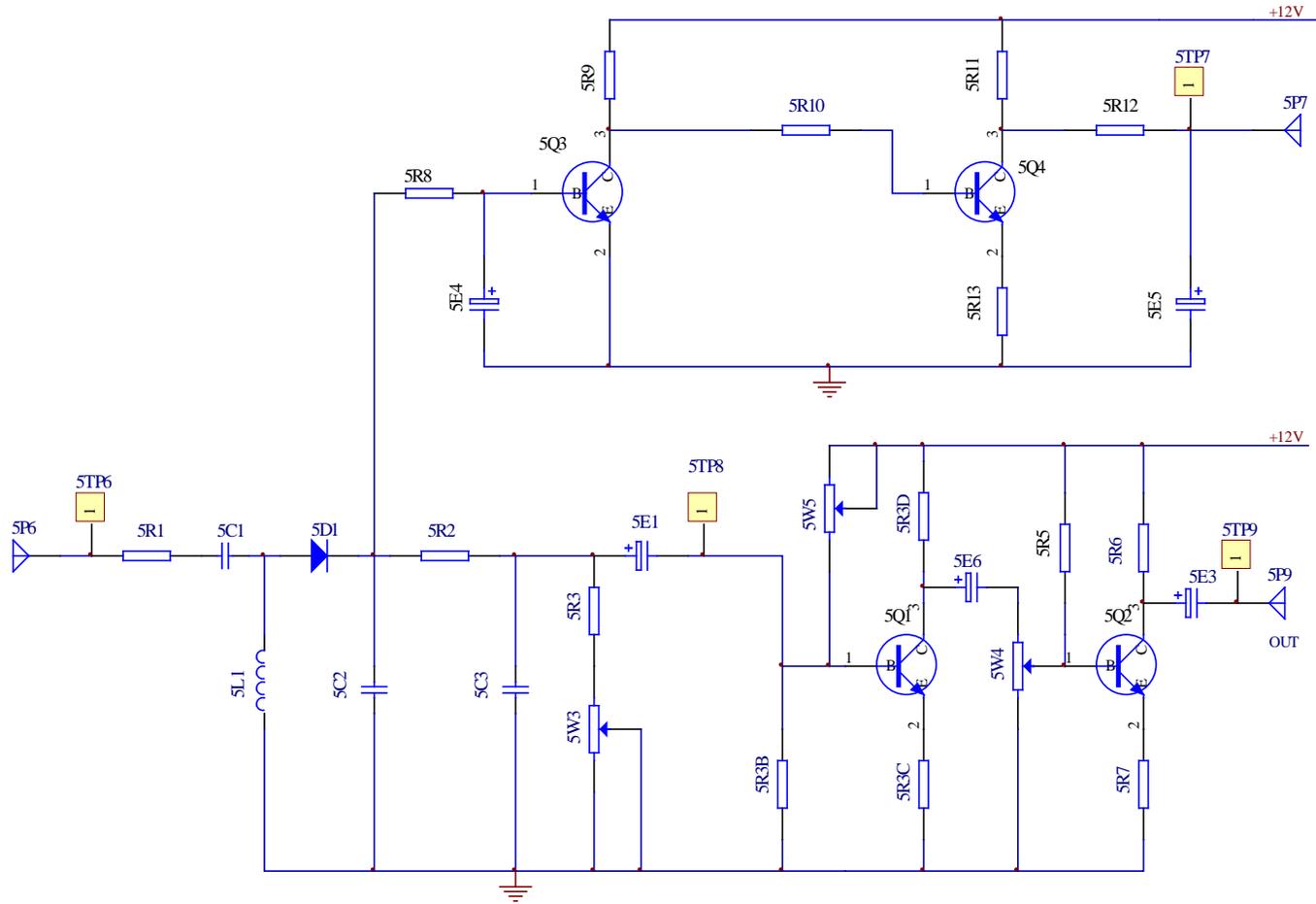


图 6-8 二极管包络检波电路

2. 同步检波

同步检波又称相干检波。它利用与已调幅波的载波同步（同频、同相）的一个恢复载波与已调幅波相乘，再用低通滤波器滤除高频分量，从而解调出调制信号。本实验采用 MC1496 集成电路来组成解调器，如图 6-9 所示。该电路图利用一片 1496 集成块构成两个实验电路，即幅度解调电路和混频电路，混频电路在前面实验 3 已作介绍，本节介绍解调电路。图中，恢复载波加到输入端 6P4 上，再经过电容 6C6 加在(8)、(10)脚之间。已调幅波加到输入端 6P5 上，再经过电容 6C7 加在(1)、(4)脚之间。相乘后的信号由(6)脚输出，再经过由 6C9、6C10、6R26 组成的 Π 型低通滤波器滤除高频分量后，在解调输出端(6P6)提取出调制信号。

需要指出的是，在图 6-9 中对 1496 采用了单电源(+12V)供电，因而(14)脚需接地，且其它脚亦应偏置相应的正电位，恰如图中所示。

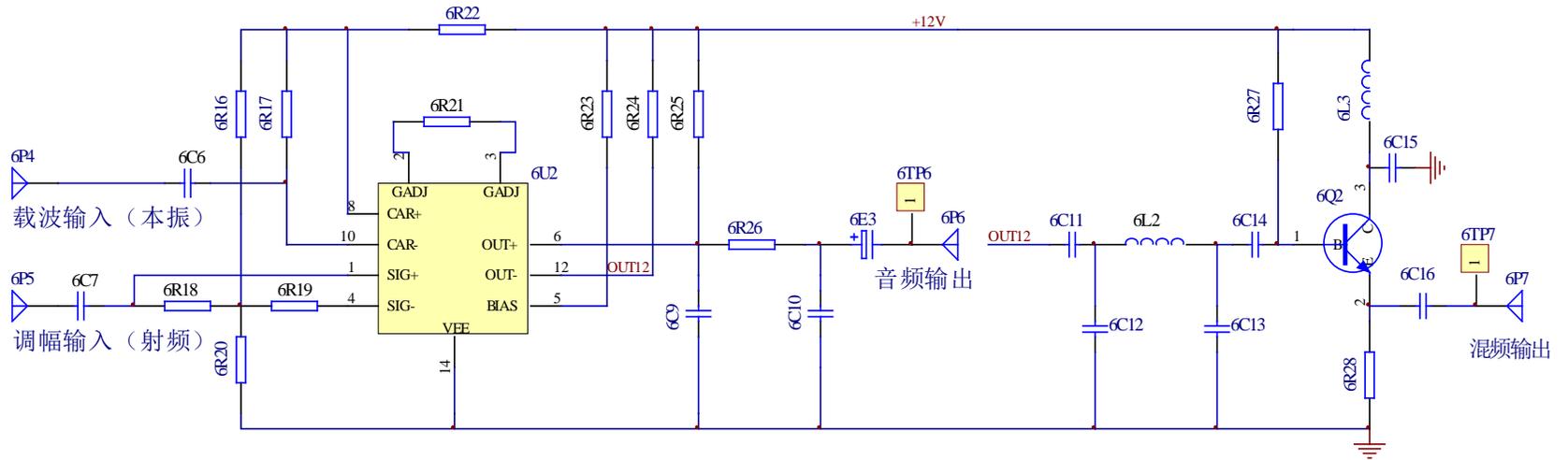


图 6-9 MC1496 组成的解调器实验电路

6-3 振幅解调实验目的、内容和步骤

一、实验目的

1. 掌握用包络检波器实现 AM 波解调的方法。了解滤波电容数值对 AM 波解调影响；
2. 理解包络检波器只能解调 $m \leq 100\%$ 的 AM 波，而不能解调 $m > 100\%$ 的 AM 波以及 DSB 波的概念；
3. 掌握用 MC1496 模拟乘法器组成的同步检波器来实现 AM 波和 DSB 波解调的方法；
4. 理解同步检波器能解调各种 AM 波以及 DSB 波的概念。

二、实验内容

1. 用示波器观察包络检波器解调 AM 波、DSB 波时的性能；
2. 用示波器观察同步检波器解调 AM 波、DSB 波时的性能；
3. 用示波器观察普通调幅波（AM）解调中的对角切割失真和底部切割失真的现象。

三、实验步骤

（一）实验准备

插装好集成乘法器调幅，混频与同步解调模块，中放 AGC 与二极管检波模块，接通实验箱电源，模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。

注意：做本实验时仍需重复调制实验中部分内容，先产生调幅波，再供这里解调之用。

（二）二极管包络检波

1. AM 波的解调

（1） $m_a = 30\%$ 的 AM 波的解调

① AM 波的获得

与振幅调制实验步骤中的 3. (1) 中的实验内容相同（参数改变一下），低频信号源（输出 1.8V_{pp} 左右的 1kHz 正弦波），以高频信号源作为载波源（输出 750mV_{pp} 的 2.1MHz 正弦波），调节 6W1（顺时针旋转编码器 6SS1）到调整度不再可调为止，便可从幅度调制电路（6P3）输出约 $m_a = 30\%$ 的 AM 波，其输出幅度（峰-峰值）应为 1.9V 左右。

② AM 波的包络检波器解调

点击显示屏，选择“实验系统”中的“高频原理实验”，然后再选择“振幅调制与解调实验”中的“二极管检波实验”，此时显示屏会显示二极管检波原理实验电路，图中各可调元件可通过点击该元件和旋转模块右下角编码器 5SS1 来调整。

把上面得到的 AM 波（6P3）加到二极管包络检波器输入端（5P6），即可用示波器在 5P9 观察到包络检波器的输出，并记录输出波形。为了更好地观察包络检波器的解调性能，可将示波器 CH1 接包络检波器的输入 5TP6，而将示波器 CH2 接包络检波器的输出 5P9（下同）。如果波形有失真，应调节 5W4。

③ 观察对角切割失真

保持以上输出，调节直流负载 5W3(点击 5W3，逆时针旋转 5SS1)，使输出产生对角失真，如果失真不明显可以加大调幅度（即调整 6W1），画出其波形。

④观察底部切割失真

先调节 5W3 使解调信号不失真。示波器 CH2 接 5P9。然后调节交 5W5，使解调信号出现割底失真，画出其相应的波形。

(2) $m_a = 100\%$ 的 AM 波的解调

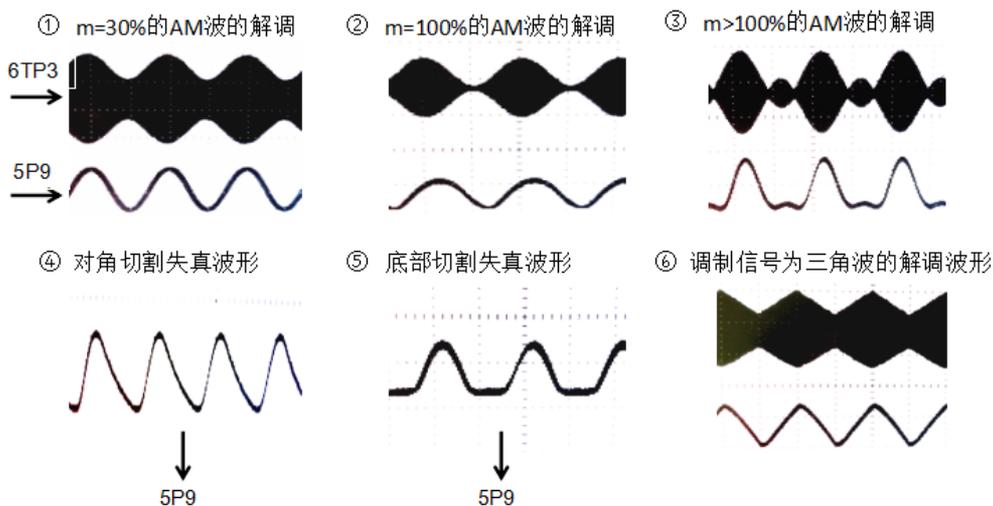
调节 6W1，使 $m_a = 100\%$ ，观察并记录检波器输出波形。

(3) $m_a > 100\%$ 的 AM 波的解调

加大音频调制信号幅度，使 $m_a > 100\%$ ，观察并记录检波器输出波形。

(4) 调制信号为三角波和方波的解调

在上述情况下，恢复 $m_a > 30\%$ ，调节 5W3 和 5W4 和 5W5，使解调输出波形不失真。然后将低频信号源的调制信号改为三角波和方波，即可在检波器输出端（5P9）观察到与调制信号相对应的波形，调节音频信号的频率，其波形也随之变化。



实际观察到各种调制度的解调波形如下图：

(三) 集成电路（乘法器）构成的同步检波

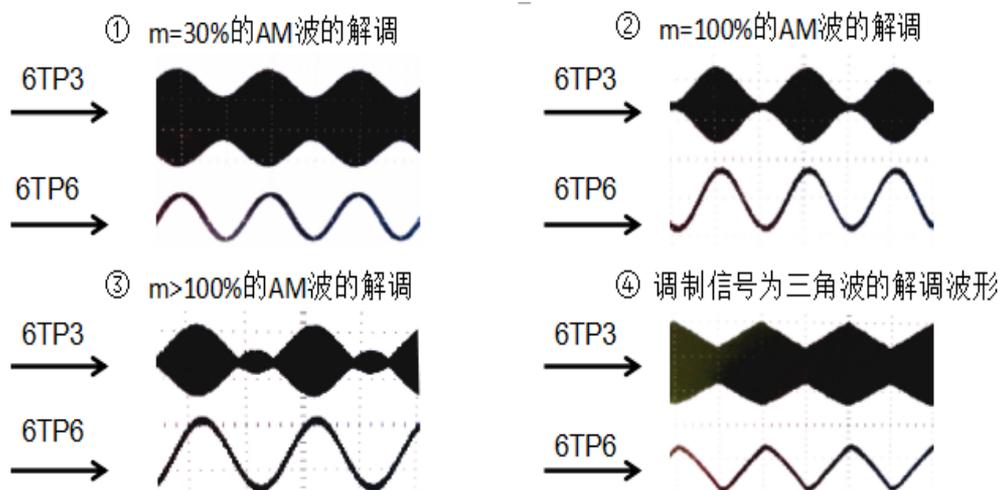
点击显示屏，选择“实验系统”中的“高频原理实验”，然后再选择“混频器实验”中的“集成混频与解调实验”。显示屏会显示集成混频与解调原理实验图。

1. AM 波的解调

将幅度调制电路的输出 6P3 接到幅度解调电路的调幅输入端 (6P5)。解调电路的 6P4，与调制电路中载波输入相连，即 6P4 与 6P1 相连。示波器 CH1 接调幅信号 6P3，CH2 接同步检波器的输出 6P6。分别观察并记录当调制电路输出为 $m_a = 30\%$ (若此时解调波形有失真，

可微调一下调制度)、 $m_a=100\%$ 、 $m_a>100\%$ 时三种 AM 的解调输出波形，并与调制信号作比较。

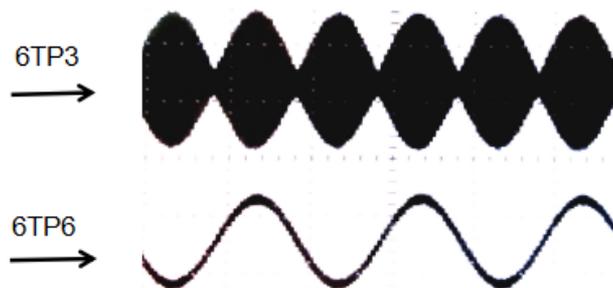
实际观察到各种调制度的解调波形如下图：



2. DSB 波的解调

采用振幅调制实验步骤 2. 中相同的方法来获得 DSB 波，并加入到幅度解调电路的调幅输入端，而其它连线均保持不变，观察并记录解调输出波形，并与调制信号作比较。改变调制信号的频率及幅度，观察解调信号有何变化。将调制信号改成三角波和方波，再观察解调输出波形。

DSB 波解调波形如下图：



四. 实验报告要求

1. 由本实验归纳出两种检波器的解调特性，以“能否正确解调”填入表中。

输入的调幅波	AM 波			DSB
	$m_a=30\%$	$m_a=100\%$	$m_a>100\%$	
包络检波				
同步检波				

2. 观察对角切割失真和底部切割失真现象并分析产生的原因。

3. 对实验中的两种解调方式进行总结。

实验 7 高频功率放大器

7-1 高频功率放大器基本工作原理

高频功率放大器是一种能量转换器件，它是将电源供给的直流能量转换为高频交流输出。高频功率放大器是通信系统中发送装置的重要组件，它也是一种以谐振电路作负载的放大器。它和小信号调谐放大器的主要区别在于：小信号调谐放大器的输入信号很小，在微伏到毫伏数量级，晶体管工作于线性区域。小信号放大器一般工作在甲类状态，效率较低。而功率放大器的输入信号要大得多，为几百毫伏到几伏，晶体管工作延伸到非线性区域——截止和饱和区，这种放大器的输出功率大，效率高，一般工作在丙类状态。

一. 高频功率放大器的原理电路

高频功放的电原理图如图 7-1 所示（共发射极放大器）

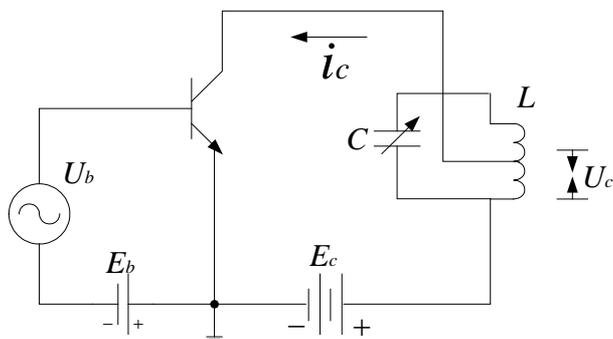


图 7-1

它主要是由晶体管、LC 谐振回路、直流电源 E_c 和 E_b 等组成， U_b 为前级供给的高频输出电压，也称激励电压。

二. 高频功率放大器的特点

1. 高频功率放大器通常工作在丙类（C 类）状态。

通角 θ 的定义：集电极电流流通角度的一半叫通角 θ 。

甲类（A 类） $\theta=180$ 度，效率约 50%；

乙类（B 类） $\theta=90$ 度，效率可达 78%；

甲乙类（AB 类） $90 < \theta < 180$ 度，效率约 $50\% < \eta < 78\%$ ；

丙类（C 类） $\theta < 90$ 度

可以推测，继续减小 θ ，使 θ 工作到小于 90 度，丙类效率将继续提高。

2. 高频功率放大器通常采用谐振回路作集电极负载。

由于工作在丙类时集电极电流 i_c 是余弦脉冲，因此集电极电流负载不能采用纯电阻，而必须接一个 LC 振荡回路，从而在集电极得到一个完整的余弦（或正弦）电压波。

我们知道，对周期性的余弦脉冲 i_c ，可用傅立叶级数展开：

$$i_c = I_{c0} + i_{c1} + i_{c2} + i_{c3} + \dots = I_{c0} + I_{c1m} \cos \omega t + I_{c2m} \cos 2\omega t + I_{c3m} \cos 3\omega t + \dots$$

式中， I_{c1m} 、 I_{c2m} 、 I_{c3m} 为基波和各次谐波的振幅。 ω 为集电极余弦脉冲电流（也就是输入信号）的角频率。LC 谐振回路被调谐于信号（角）频率，对基波电流 i_c 呈现一个很大的纯阻，因而回路两端的基波压降很大。回路对直流成分和其它谐波失谐很大，相应的阻抗很小，因而相应的电压成分很小，因此直流和各次谐波在回路上的压降可以忽略不计。这样，尽管集电极电流 i_c 为一个余弦脉冲，但集电极电压 U_{ce} 却为一个完整的不失真的余弦波（基波成分）。

显然，LC 振荡回路起到了选频和滤波的作用：选出基波，滤除直流和各次谐波。

LC 振荡回路的另一个作用是阻抗匹配。也就是可以改变回路（电感）的接入参数，使功放管得到最佳的负载阻抗，从而输出最大的功率。

三. 丙类调谐功率放大器基本原理

由于丙类调谐功率放大器采用的是反向偏置，在静态时，管子处于截止状态。只有当激励信号 u_b 足够大，超过反偏压 E_b 及晶体管起始导通电压 U_j 之和时，管子才导通。这样，管子只有在一周期的一小部分时间内导通。所以集电极电流是周期性的余弦脉冲，波形如图 7-2 所示。

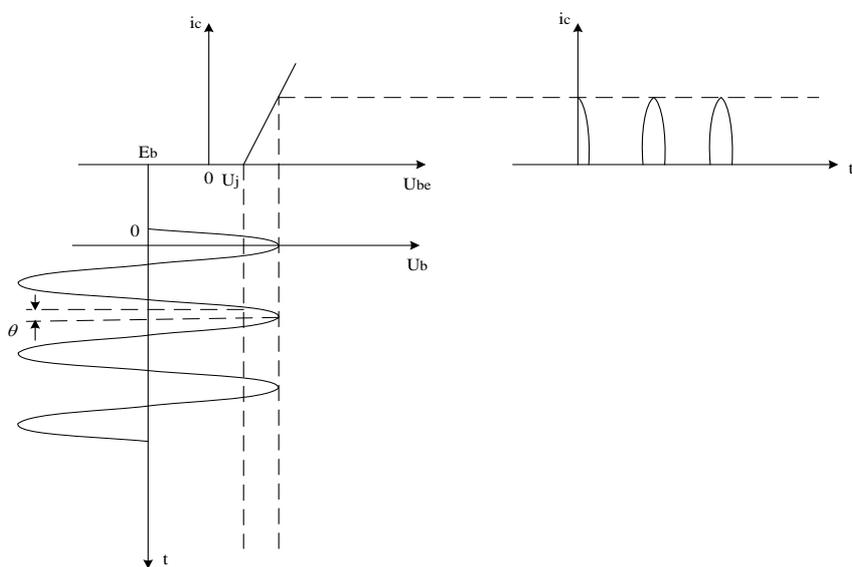


图 7-2 折线法分析非线性电路电流波形

根据调谐功率放大器在工作时是否进入饱和区，可将放大器分为欠压、过压和临界三种工作状态。若在整个周期内，晶体管工作不进入饱和区，也即在任何时刻都工作在放大区，称放大器工作在欠压状态；若刚刚进入饱和区的边缘，称放大器工作在临界状态；若晶体管工作时有一部分时间进入饱和区，则称放大器工作在过压状态。放大器的这三种工作

状态取决于电源电压 E_c 、偏置电压 E_b 、激励电压幅值 U_{bm} 以及集电极等效负载电阻 R_c 。

(1) 激励电压幅值 U_{bm} 变化对工作状态的影响

当调谐功率放大器的电源电压 E_c 、偏置电压 E_b 和负载电阻 R_c 保持恒定时，激励振幅 U_{bm} 变化对放大器工作状态的影响如图7-3所示。

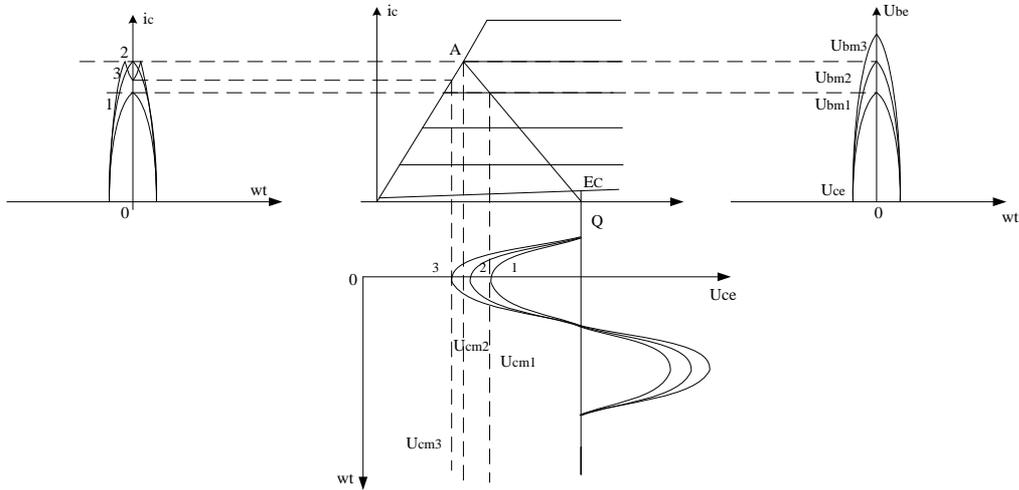


图7-3 U_{bm} 变化对工作状态的影响

由图可以看出，当 U_{bm} 增大时， i_{cmax} 、 U_{cm} 也增大；当 U_{bm} 增大到一定程度，放大器的工作状态由欠压进入过压，电流波形出现凹陷，但此时 U_{cm} 还会增大（如 U_{cm3} ）。

(2) 负载电阻 R_c 变化对放大器工作状态的影响

当 E_c 、 E_b 、 U_{bm} 保持恒定时，改变集电极等效负载电阻 R_c 对放大器工作状态的影响，如图7-4所示。

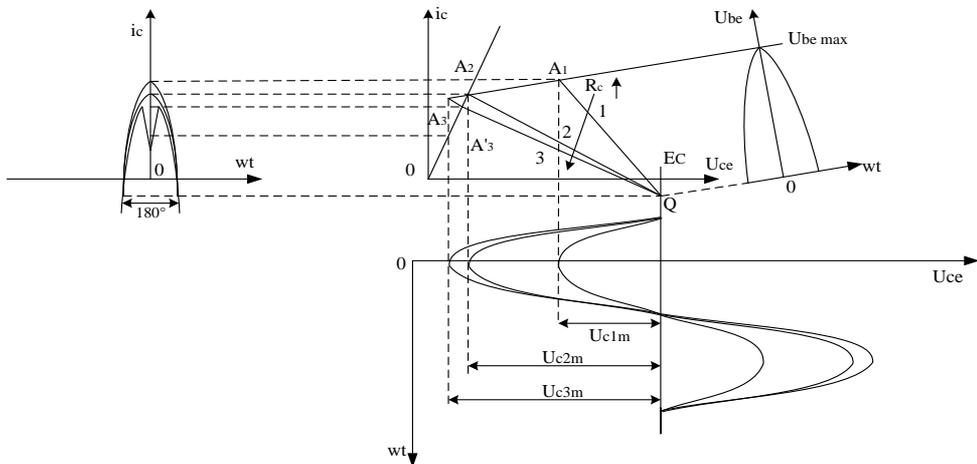


图7-4 不同负载电阻时的动态特性

图7-4表示在三种不同负载电阻 R_c 时，做出的三条不同动态特性曲线QA₁、QA₂、QA₃A₃'。其中QA₁对应于欠压状态，QA₂对应于临界状态，QA₃A₃' 对应于过压状态。QA₁相对应的负载电阻 R_c 较小， U_{cm} 也较小，集电极电流波形是余弦脉冲。随着 R_c 增加，动态负载线的斜率逐渐减小， U_{cm} 逐渐增大，放大器工作状态由欠压到临界，此时电流波形仍为余弦脉冲，只是幅值比欠压时略小。当 R_c 继续增大， U_{cm} 进一步增大，放大器进入过压状态，此时动态负载线QA₃与饱和线相交，此后电流 i_c 随 U_{cm} 沿饱和线下降到A₃'，电流波形顶端下凹，呈马鞍形。

(3) 电源电压 E_C 变化对放大器工作状态的影响

在 E_b 、 U_{bm} 、 R_c 保持恒定时，集电极电源电压 E_C 变化对放大器工作状态的影响如图7-5所示。

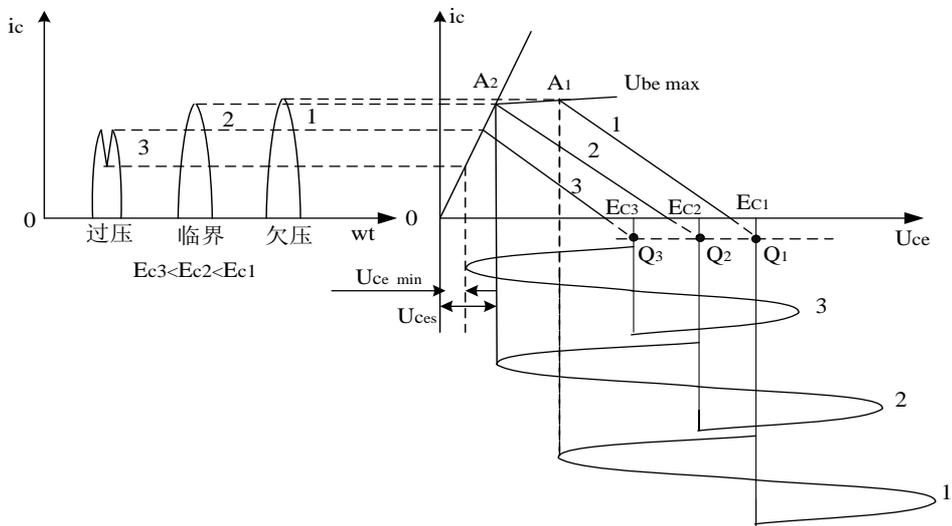


图7-5 E_C 改变时对工作状态的影响

由图可见， E_C 变化， $U_{ce min}$ 也随之变化，使得 $U_{ce min}$ 和 U_{ces} 的相对大小发生变化。当 E_C 较大时， $U_{ce min}$ 具有较大数值，且远大于 U_{ces} ，放大器工作在欠压状态。随着 E_C 减小， $U_{ce min}$ 也减小，当 $U_{ce min}$ 接近 U_{ces} 时，放大器工作在临界状态。 E_C 再减小， $U_{ce min}$ 小于 U_{ces} 时，放大器工作在过压状态。图7-5中， $E_C > E_{C2}$ 时，放大器工作在欠压状态； $E_C = E_{C2}$ 时，放大器工作在临界状态； $E_C < E_{C2}$ 时，放大器工作在过压状态。即当 E_C 由大变小时，放大器的工作状态由欠压进入过压， i_c 波形也由余弦脉冲波形变为中间凹陷的脉冲波。

7-2 高频功率放大器实验电路

高频功率放大器实验电路如图7-6所示。

本实验单元由两级放大器组成，3Q1是前置放大级，工作在甲类线性状态，以适应较小的输入信号电平。高频信号由3P2输入，经3R26、3C21加到3Q1的基极。3TP2、3TP3为该级输入、输出测量点。由于该级负载是电阻，对输入信号没有滤波和调谐作用，因而既可作为调幅放大，也可作为调频放大。当3K2跳线去掉时（或跳线置off时），3Q2为丙类高频功率放大电路，其基极偏置电压为零，通过发射极上的电压构成反偏。因此，只有在载波的正半周且幅度足够大时才能使功率管导通。其集电极负载为LC选频谐振回路，谐振在载波频率上已选出基波，因此可获得较大的功率输出。本实验功放有两个选频回路，由3K3来选定。当3K3拨至左侧（1、2，接通）时，所选谐振回路由3L2、3L4、3C16、3C17和3C20组成，其谐振频率为6.3MHZ左右，此时的功放可用于构成无线收发系统。当3K3拨至右侧时（2、3接通），谐振回路由3L1、3C10组成，其谐振回路谐振频率为2MHZ左右。此时可用于测量三种状态（欠压、临界、过压）下的电流脉冲波形，因频率较低时测量效果较好。在测量三种状态下的电流脉冲波形时，3K5用于控制负载电阻的接通与否，3W4电位器用来改变负载电阻的大小，3TP6用于测量负载电阻大小。3W3用来调整功放集电极电源电压的大小，3TP7为电压测量点。在谐振频率为6.3MHZ时，3K4用于控制是否接通3R28，当3K4往上（OFF），断开3R28，3K4往下（ON）接通3R28（100 Ω ），此时可测量输出功率的大小。3P1为音频信号输入口，加入音频信号时可对功放进行基极调幅。3TP4为功放输出测试点，3TP5为发射极测试点，可在该点测量电流脉冲波形。当输入信号为调幅波时，3Q2不能工作在丙类状态，因为当调幅波在波谷时幅度较小，3Q2可能不导通，导致输出波形严重失真。因此，输入信号为调幅波时，3K2跳线器必须接通，使3Q2工作在甲类状态。

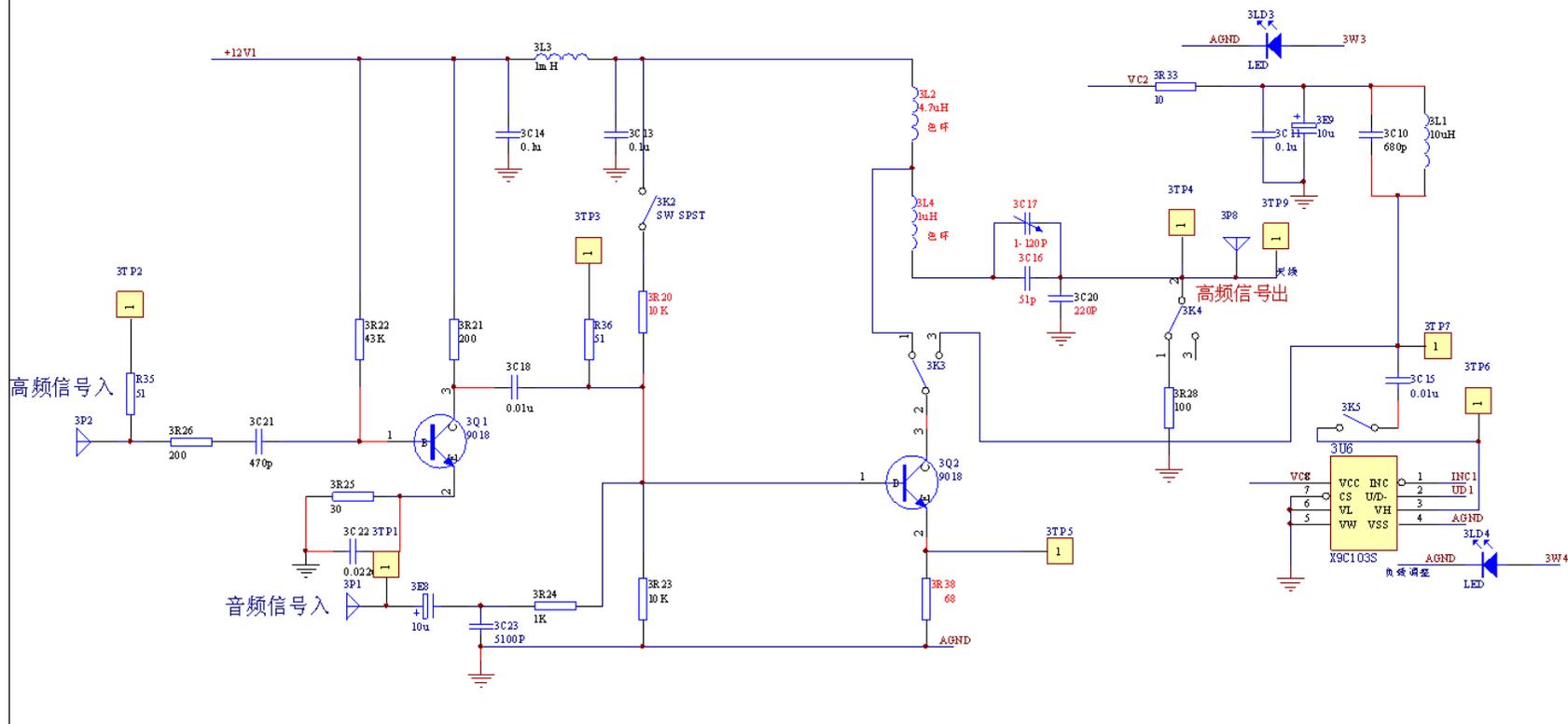


图7-6 高频功率放大与发射实验图

7-3 高频功率放大器实验目的、内容和步骤

一、实验目的

1. 通过实验，加深对丙类功率放大器基本工作原理的理解，掌握丙类功率放大器的调谐特性。
2. 掌握输入激励电压，集电极电源电压及负载变化对放大器工作状态的影响。
3. 通过实验进一步了解调幅的工作原理。

二、实验内容

1. 观察高频功率放大器丙类工作状态的现象，并分析其特点；
2. 测试丙类功放的调谐特性；
3. 测试负载变化时三种状态（欠压、临界、过压）的余弦电流波形；
4. 观察激励电压、集电极电压变化时余弦电流脉冲的变化过程；
5. 观察功放基极调幅波形；
6. 测量功放输出功率。

三、实验步骤

1. 实验准备

插好高频功放与无线发射模块，接通实验箱电源，此时模块上的电源指示灯和运行指示灯闪亮。

点击显示屏，选择“实验系统”中的“高频原理实验”，然后再选择“非线性丙类功率放大电路实验”，此时显示屏会显示高频功放原理实验图，图中3W3和3W4可调元件可通过点击和旋转模块右下角编码器3SS1来调整。图中的开关和跳线器因为不是电子控制的，只能通过手工操作。

2. 测试前置放大级输入、输出波形

高频信号源频率设置为6.3MHZ，幅度峰-峰值400mV左右，用连接线接到高频输入端3P2，用示波器测试3TP2和3TP3的波形的幅度，并计算其放大倍数。由于该级集电极负载是电阻，没有选频作用。

3. 激励电压、电源电压及负载变化对丙类功放工作状态的影响

(1) 激励电压 U_b 对放大器工作状态的影响

3K3置“右侧”。保持集电极电源电压 $E_c=7.2V$ 左右（用万用表测3TP7直流电压，万用表档位切换到直流电压20V档，正表笔接3TP7，负表笔接GND，点击3W3，旋转3SS1使其电压为7.2V），负载电阻 $R_L=2.5K\Omega$ 左右（3K5置“off”，用万用表测3TP6电阻，万用表档位切换到20K档，一端接3TP6，一端接地，点击3W4，旋转3SS1使负载电阻为2.5K Ω ，调好后3K5置“on”）不变。

高频信号源频率2.1MHZ左右，幅度360mv（峰-峰值），连接至功放模块输入端（3P2）。

示波器接3TP5, 微调一下高频信号源频率（此时频率步长值一般选择10K档），使输出波形对称，改变信号源幅度，即改变激励信号电压 U_b ，观察3TP5电压波形。信号源幅度变化时，应观察到欠压、临界、过压脉冲波形。其波形如图7-7所示（如果波形不对称，应微调高频信号源频率，注意选择合适的频率步长档位）。

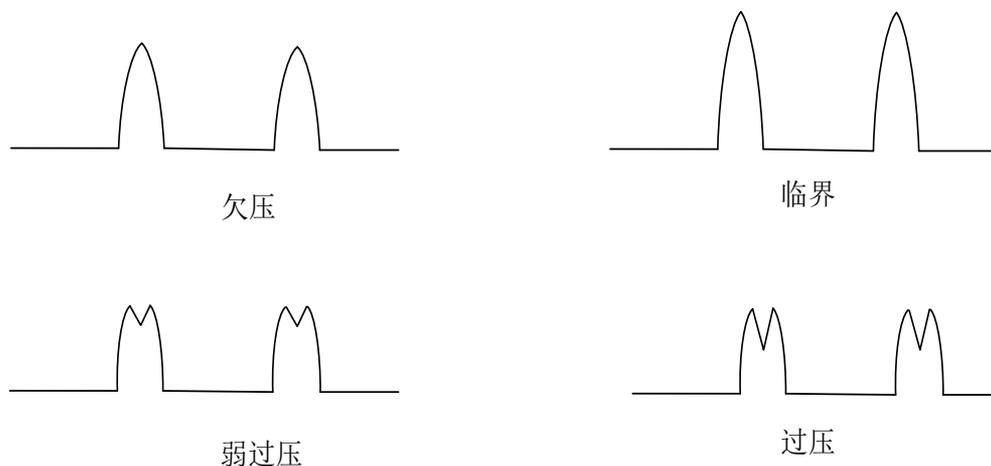
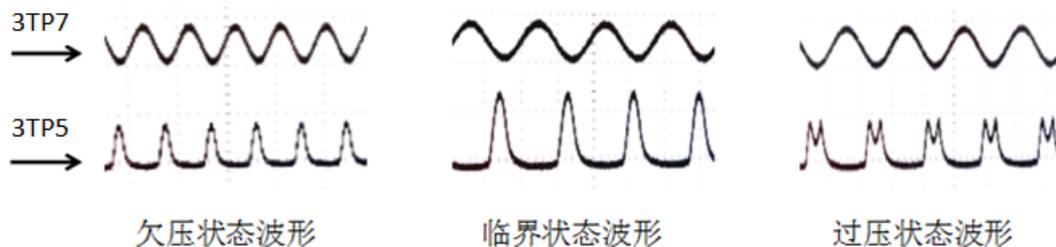


图7-7 三种状态下的电流脉冲波形

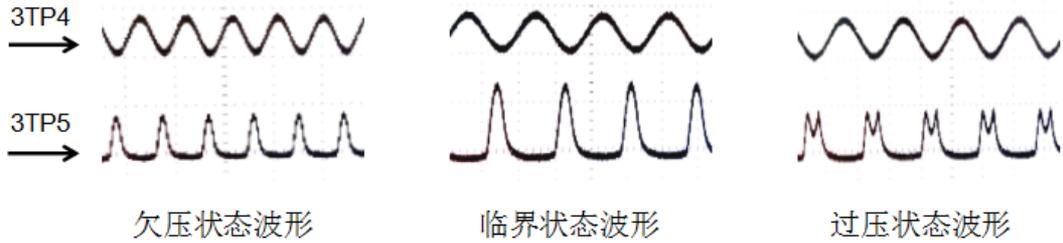
实际观察到的波形如下图：



(2) 集电极电源电压 E_c 对放大器工作状态的影响

保持激励电压 U_b （3TP2电压为300mv峰—峰值）、负载电阻 $R_L=2.5K\Omega$ 不变，改变功放集电极电压 E_c （调整3W3电位器，使 E_c 为5—10V变化），观察3TP5电压波形。调整电压 E_c 时，仍可观察到图7-7的波形。

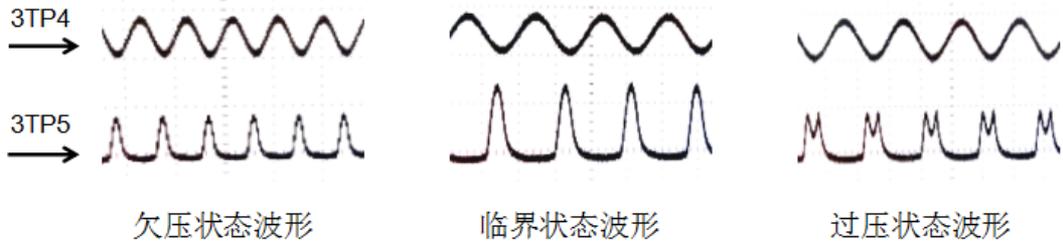
实际观察到的波形如下图：



(3) 负载电阻 R_L 变化对放大器工作状态的影响

保持功放集电极电压 $E_c = 7.2V$ ，激励电压（3TP2点电压、300mv峰—峰值）不变，改变负载电阻 R_L （调整3W4电位器，注意3K5至“on”），观察3TP5电压波形。同样能观察到图7-7的脉冲波形。测出欠压、临界、过压时负载电阻的大小。测试电阻时必须将3K5拨至“off”，测完后再拨至“on”。

实际观察到的波形如下图：



4. 功放调谐特性测试

3K3置“左侧”，3K2置“off”，3K4置“OFF”。高频信号源接入前置级输入端（3P2），峰-峰值400mV。以6.3MHZ的频率为中心点，以200KHZ为频率间隔，向左右两侧画出5个频率测量点，画出一个表格。设计的表格如下：

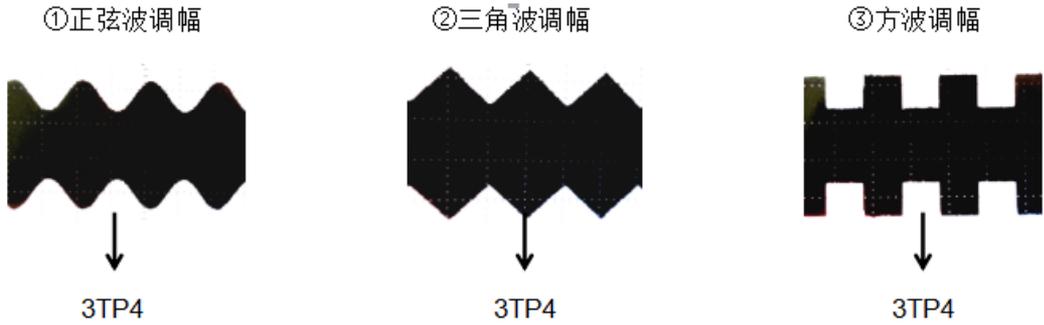
$f(MHZ)$	5.3	5.5	5.7	5.9	6.1	6.3	6.5	6.7	6.9	7.1	7.3
$V_c(V_{P-P})$											

首先将高频信号源设置为6.3MHZ，峰-峰值为400mV，，用示波器测试3TP4，然后高频信号源按照表格上的频率变化，幅度峰-峰值为400mV左右（3P2），用示波器测量3TP4的电压值。测出与频率相对应的电压值填入表格，然后画出频率与电压的关系曲线。

5. 功放调幅波的观察

保持上述4的状态，调整高频信号源的频率，使功放谐振，即使3TP4点输出幅度最大。然后从3P1输入音频调制信号，用示波器观察3TP4的波形。此时该点波形应为调幅波，改变音频调制信号的幅度，输出调幅波的调制度应发生变化（幅度太大时，波形可能会出现失真）。改变调制信号的频率，调幅波的包络亦随之变化。

实际观测的调幅波如下图：



6. 功放输出功率的测试

保持上述4的状态，3K4置“ON”即接通3R28(100Ω)。高频信号源的频率设置为6.3MHZ，用示波器测试功放输出3P8或3TP4。调整高频信号源输入幅度，使功放输出幅度最大。测量出此时3R28上（即输出）的振幅值，由振幅值换算成有效值，即可算出功放的输出功率。

$$P = \frac{U^2}{100}。$$

四. 实验报告

1. 认真整理实验数据，对实验参数和波形进行分析，说明输入激励电压、集电极电源电压，负载电阻对工作状态的影响。
2. 用实测参数分析丙类功率放大器的特点。
3. 总结由本实验所获得的体会。

实验 8 频率调制（变容二极管调频器）

8-1 频率调制工作原理

使高频振荡的频率按调制信号作相应变化的调制方式，叫频率调制，简称调频（FM）。调制后调频振荡称为频调波。通过频率调制来传递消息的通信方式称调频通信。

一. 调频及其数学表达式

设调制信号为 $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega m} \cos \Omega \omega t$ ，载波信号为 $u_c(t) = U_m \cos \omega_c t$ 。

调频时，载波高频振荡的瞬时频率随调制信号 $u_{\Omega}(t)$ 呈线性变化，其比例系数为 K_f ，即 $\omega(t) = \omega_c + K_f u_{\Omega}(t) = \omega_c + \Delta\omega(t)$ ，式中， ω_c 是载波角频率，也是调频信号的中心角频率。 $\Delta\omega(t)$ 是由调制信号 $u_{\Omega}(t)$ 所引起的角频率偏移，称频偏或频移。 $\Delta\omega(t)$ 与 $u_{\Omega}(t)$ 成正比， $\Delta\omega(t) = K_f u_{\Omega}(t)$ 。 $\Delta\omega(t)$ 的最大值称为最大频偏，用 $\Delta\omega$ 表示：

$$\Delta\omega = |\Delta\omega(t)|_{\max} = K_f |u_{\Omega}(t)|_{\max}$$

单音频调制时，对于调频信号，它的 $\omega(t)$ 为

$$\omega(t) = \omega_c + K_f U_{\Omega m} \cos \Omega t = \omega_c + \Delta\omega \cos \Omega t$$

由此就得到调频信号的数学表达式，即有

$$u(t) = U_m \cos \left[\int (\omega_c + \Delta\omega \cos \Omega t) dt + \varphi \right] = U_m \cos \left(\omega_c t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi \right)$$

假定初相角 $\varphi = 0$ ，则得

$$u(t) = U_m \cos \left(\omega_c t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t \right)$$

式中， $\frac{\Delta\omega}{\Omega}$ 叫调频波的调制指数，以符号 m_f 表示，即

$$m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$$

它是最大频偏 $\Delta\omega$ 与调制信号角频率 Ω 之比。 m_f 值可以大于 1（这与调幅波不同，调幅指数 m_a 总是小于等于 1 的）。所以调频波数学表达式为

$$u(t) = U_m \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t + \varphi)$$

调频信号随调制信号的变化情况如图 8-1 所示。在调制电压的正半周，载波振荡频率随调制电压变化而高于载频，到调制电压的正峰值时，已调高频振荡角频率至最大值，为 $\omega_{\max} = \omega_c + \Delta\omega$ ；在调制信号负半周，载波振荡频率随调制电压变化而低于载频，到调制电压负峰处，已调高频振荡角频率至最小值， $\omega_{\min} = \omega_c - \Delta\omega$ 。

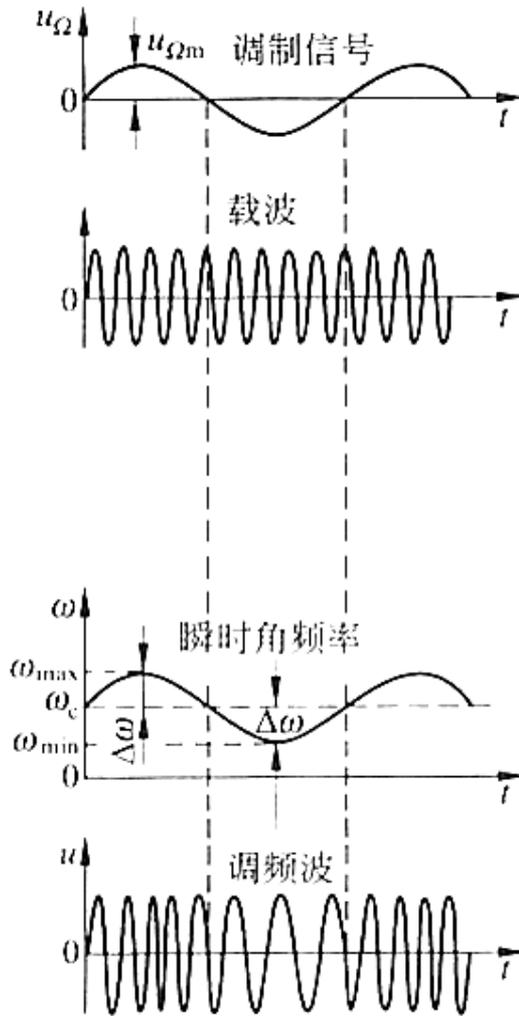


图 8-1

二. 调频波的频谱

上述频调波的频谱分析是非常复杂的，需用复杂的数学工具，这里只给出结论。

当 $m_f \ll 1$ 时，频调波的频谱和幅调波一样，也是由载频 f_0 和一对边频

$$f_0 + F, f_0 - F \left(F = \frac{\Omega}{2\pi} \right) \text{ 组成,}$$

如图 8-2 (a) 所示。但下边频的相位和上边频差 180 度。如果调制信号是一个频带，则上下边频就成了上下边带。

当 m_f 逐渐增大，边频数也逐步增大，实际上包含载频和无数对边频。

如果把调制前载波振幅 I_{cm} 的 15% 以上的边频作为有效边频，有效边频所占的频带宽度称为有效频带宽度 B ，则当 $m_f > 2$ 时（这时为宽带调频）， $B \approx 2m_f F \approx 2\Delta f_{\max}$ ，图 8-2 (b) 画出了 $m_f = 3$ 时频调波的振幅频谱。

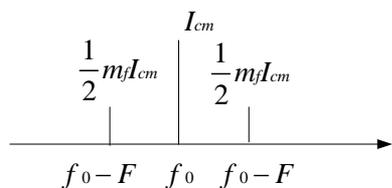


图 8-2(a)

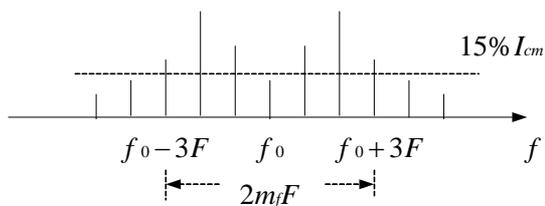


图 8-2(b)

总之，频调波的频谱成份，理论上有无穷多，所以频率调制是一种非线性调制。

三. 调频信号的产生

1. 调频方法

调频就是用调制电压去控制载波的频率。调频的方法和电路很多，最常用的可分为两大类：直接调频法和间接调频法。

直接调频就是用调制电压直接去控制载频振荡器的频率，以产生调频信号。例如：被控电路是 LC 振荡器，那么，它的振荡频率主要由振荡回路电感 L 与电容 C 的数值来决定，若在振荡回路中加入可变电抗，并用低频调制信号去控制可变电抗的参数，即可产生振荡频率随调制信号变化的调频波。在实际电路中，可变电抗元件的类型有许多种，如变容二极管、电抗管等。

间接调频法就是保持振荡器的频率不变，而用调制电压去改变载波输出的相位，这实际上是调相。由于调相和调频有一定的内在联系，所以只要附加一个简单的变换网络，就可以从调相获得调频。所以间接调频，就是先进行调相，再由调相变为调频。

目前采用最多的是变容二极管直接调频法，下面主要介绍这种方法。

2. 变容二极管的特性

变容二极管是利用半导体 PN 结的结电容随外加反向电压而变化这一特性，所制成的一种半导体二极管。它是一种电压控制可变电抗元件。

变容二极管的符号如图 8-3(a) 所示，图 8-3(b) 是其串联和并联的等效电路。其中 C_d 代表二极管的电容， $R_{\#}$ 或 $R_{\#}$ 代表串联或并联的等效损耗电阻。由于二极管正常工作于反向状态，其损耗很小，故 $R_{\#}$ 很大而 $R_{\#}$ 很小。

变容二极管与普通二极管相比，所不同的是在反向电压作用下的结电容变化较大。

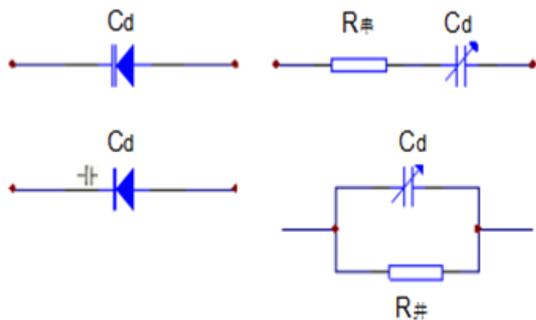


图8-3(a)

图8-3(b)

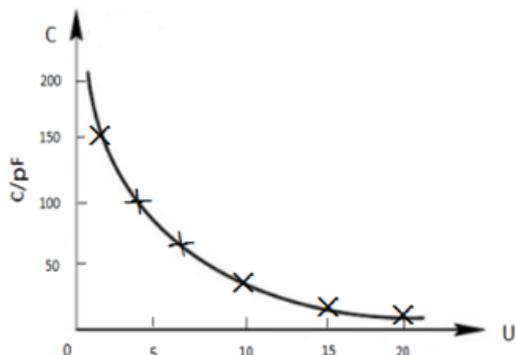


图8-4 反向电压

变容二极管的电容 C 随着所加的反向偏压 U 而变化。图 8-4 是 $C-U$ 特性曲线。

由图 8-4 可知，反偏压越大，则电容越小。这种特性可表示为 $C = A(U - U')^{-n}$ 。式中， A 为常数，它决定于变容二极管所用半导体的介电常数、杂质浓度和结的类型； U' 为 PN 结势垒电压，一般在 0.7V 左右； U 为外加反偏压； n 为电容变化系数，它的数值决定于结的类型，对于缓变结， $n \approx \frac{1}{3}$ ，突变结的 $n \approx \frac{1}{2}$ ，超突变结的 $n > \frac{1}{2}$ 。 n 是变容二极管的主要参数之一。 n 值越大，电容变化量随偏压变化越显著。

3. 变容二极管调频电路

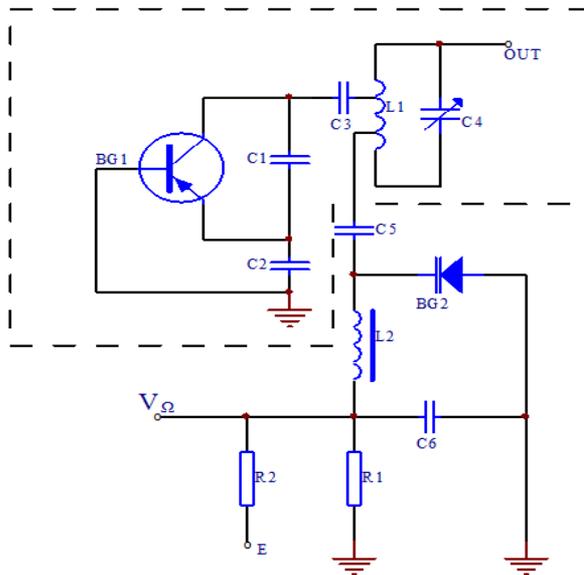


图 8-5

图 8-5 为某发信机的调频电路，其中，虚线框部分为共基极的西勒振荡器，图中仅画出了交流等效电路。框外部分为变容二极管调频器。下面就来讨论其工作原理。

直流电压 E 通过 $R_1 R_2$ 分压后，经高频扼流圈 L_2 加到变容二极管 BG_2 的负端， BG_2 的正端接地。这样 BG_2 就得到了反向偏置。 L_2 对高频起扼流作用，对直流和低频可认为短路。 C_6 为高频旁路电容，话音调制电压 V_Ω 经 L_2 也加到 BG_2 的两端，使 BG_2 的结电容随 V_Ω 而变。和 C_6 防止 L_2 高频电流流向 $R_1 R_2$ 、电源 E 和低频信号源 V_Ω 。

下面来分析振荡器的频率（或频偏）和调制信号的关系。通常 $C_5 \gg C_j$ ， $C_3 \ll C_1$ ， $C_3 \ll C_2$ ，因此， C_5 、 C_1 、 C_2 均可忽略，振荡回路可简化为图 8-6。

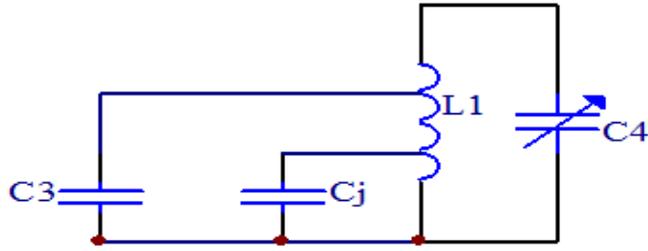


图 8-6

设 C_3 的接入系数为 P_3 ， C_j 的接入系数为 P_j ，那么可把 C_3 和 C_j 折合到 L_1 两端，回路可进一步简化成图 8-7。

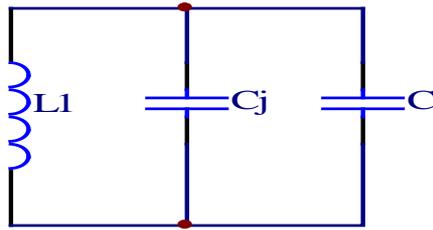


图 8-7

图中， $C = P^2_3 C_3 + C_4$ ， $C'_j = P^2_j C_j$ ，因而振荡器的振荡角频率

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1(C + C_j)}} = \frac{1}{\sqrt{(P^2_3 C_3 + C_4 + P^2_j C_j)L}}$$

在进行调频时， C_j 将随调制信号 V_Ω 而变，因而 ω 也将随之而变。图 8-8 画出了 V_Ω 如何引起 ω 变化的工作过程。

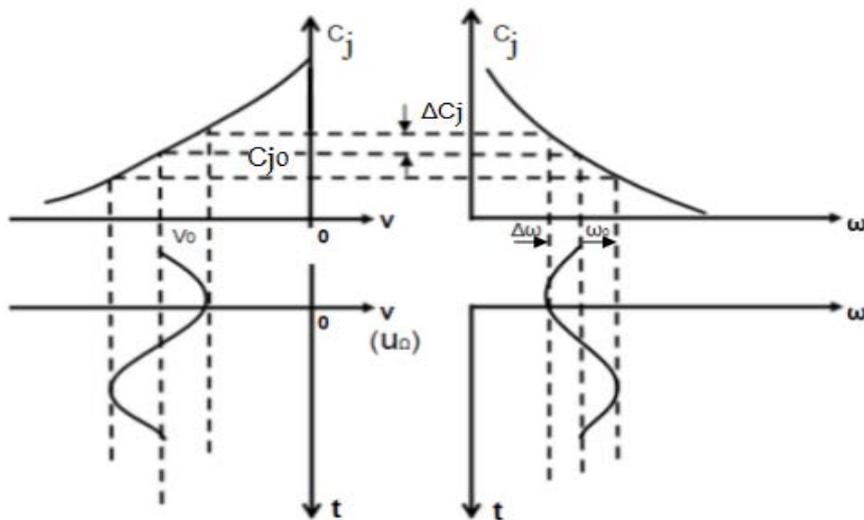


图 8-8

图中， $\omega - C_j$ 曲线是根据上述公式，在 C_3 、 C_4 、 P_3 、 P_j 一定时绘出的。当 V_Ω 按余弦规律变化时， C_j 也在 C_{j0} 基础上作相应变化，通过 $\omega - C_j$ 曲线，可求得 ω 作相应变化的曲线。可以证明在工作点（即 $V = V_o$ ）附近的区域内， ω 和 V_Ω 成线性关系，因而 ω 也按余弦规律变化。 $\omega = \omega_0 + KV_\Omega = \omega_0 + KV_{\Omega m} \cos \Omega t$ ， K 为一常数。上式表明已正确实现了调频。当 $V_{\Omega m}$ 很大时， $\Delta\omega$ 与 ΔV 就不能保持线性关系，一般 $V_{\Omega m}$ 不能过大， m_f 约为 1-2，带宽在 20KHZ 左右。变容二极管不能出现正向导通，否则，它的很小的正向内阻，将使回路 Q 值大大降低，影响振荡器的稳定。

根据上面的分析，可以画出 $\Delta f \sim \Delta V$ 关系曲线（如图 8-9），即调制特性。当 ΔV 较小时为直线。当 ΔV 较大时，则出现弯曲。曲线的斜率即 $\frac{\Delta f}{\Delta V}$ ，

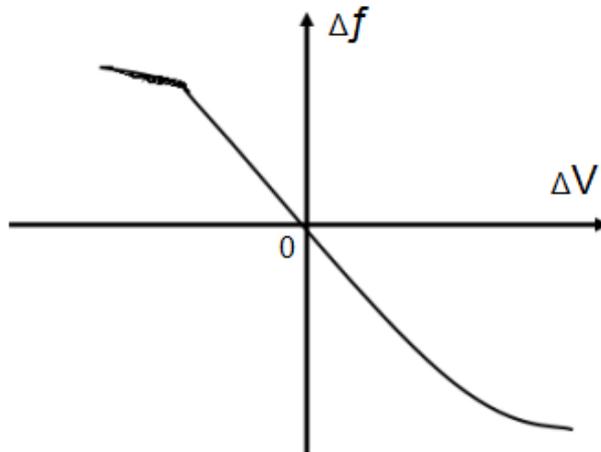


图 8-9

表示调制电压对振荡频率的控制能力，叫做控制灵敏度。显然我们希望控制灵敏度高一些。

变容二极管调频法的主要缺点是中心频率不稳。这一方面是由于振荡器本身是 LC 振荡器，稳定度不高，另一方面变容二极管的 C_j 受外界的影响比较大。

8-2 频率调制实验电路

一. 变容二极管调频器实验电路

变容二极管调频器实验电路如图 8-10 所示。图中，4Q1 本身为电容三点式振荡器，它与 4D1（变容二极管）一起组成了直接调频器。4Q2 为放大器，4Q3 为射极跟随器。4W1 用来调节变容二极管偏压，4W2 用来调整输出幅度。

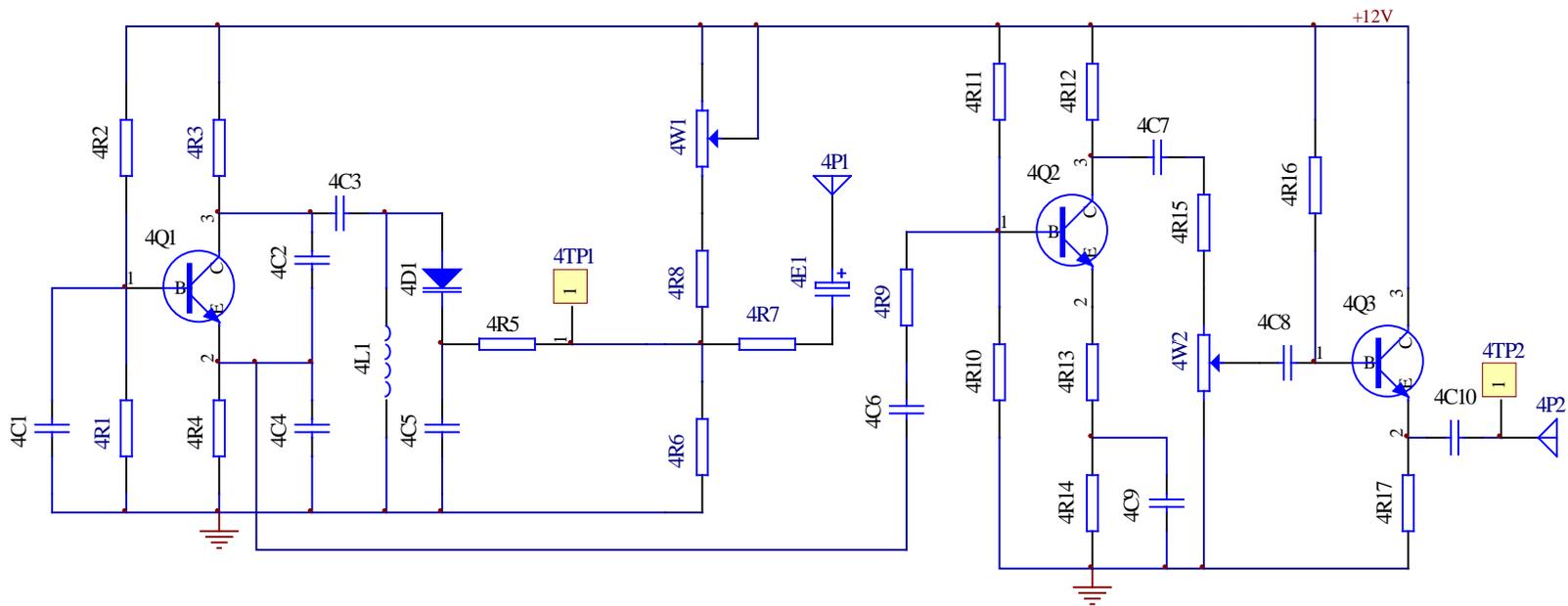


图 8-10 变容二极管调频器实验电路

二. 变容二极管调频器工作原理

由图 8-10 可见,加到变容二极管上的直流偏置就是+12V 经由 4W1、4R8 和 4R6 分压后,从 4R6 得到的电压,因而调节 4W1 即可调整偏压。由图可见,该调频器本质上是一个电容三点式振荡器(共基接法),由于电容 4C5 对高频短路,因此变容二极管实际上与 4L1 相并。调整电位器 4W1,可改变变容二极管的偏压,也即改变了变容二极管的容量,从而改变其振荡频率。因此变容二极管起着可变电容的作用。

图中 4P1 为音频信号(调制信号)输入口,音频信号通过 4E1、4R7、4R5 加到变容管 4D1 的负端,对输入音频信号而言,4C5 开路,从而音频信号可加到变容二极管两端。当变容二极管加有音频信号时,其等效电容按音频规律变化,因而振荡频率也按音频规律变化,从而达到了调频的目的。

8-3 频率调制实验目的、内容和步骤

一. 实验目的

1. 熟悉电子元器件和高频电子线路实验系统；
2. 掌握用变容二极管调频振荡器实现 FM 的方法；
3. 理解静态调制特性、动态调制特性概念和测试方法。

二. 实验内容

1. 用示波器观察调频器输出波形，考察各种因素对于调频器输出波形的影响；
2. 变容二极管调频器静态调制特性测量；
3. 变容二极管调频器动态调制特性测量。

三. 实验步骤

1. 实验准备

插装好变容管调频与相位鉴频模块，接通实验箱电源，模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。

点击显示屏，选择“实验系统”中“高频原理实验”，然后再选择“变容二极管调频实验”，显示屏上会显示出变容二极管调频原理实验图，图中各可调电位器可通过点击该元件和旋转模块右下角编码器4SS1来调整。

2. 静态调制特性测量

输入端先不接音频信号，将示波器接到调频器单元的输出4TP2。将频率计接到调频输出（4P2），用万用表测量4TP1点电位值，按表8-1所给的电压值调节电位器4W1，使4TP1点电位在0.5—4.5V范围内变化，并把相应的频率值填入表8-1。

表8-1

$V_{12TP1}(V)$	0.5	1	1.5	2.0	2.5	3	3.5	4.0	4.5
$F_0(\text{MHz})$									

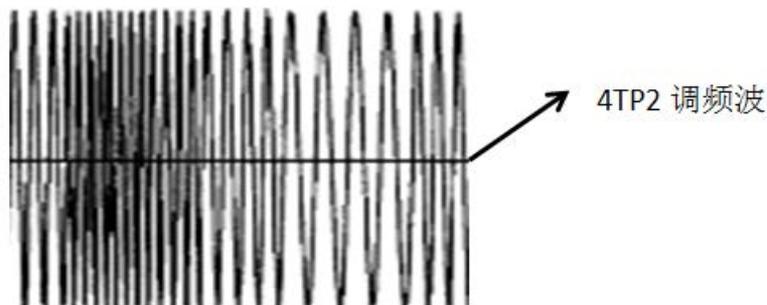
3. 动态调制特性测量

①调整 4W1 使得变容二极管调频器输出频率 $f_0=6.3\text{MH}$ 左右。

②以实验箱上的低频信号源作为音频调制信号，输出频率 $f=2\text{kHz}$ 、峰-峰值 $V_{p-p}=1\text{v}$ （用示波器监测）的正弦波。

③把实验箱上的低频信号源输出的音频调制信号加入到调频器单元的音频输入端 4P1，便可在调频器单元的输出端 4TP2 端上观察到 FM 波。

用示波器观察到的调频波形如下图：



④把调频器单元的调频输出端 4P2 连接到鉴频器单元的输入端（4P3），并将鉴频器单元的 4K1 拨向斜率鉴频，便可在鉴频器单元的输出端 4TP5 上观察到经解调后的音频信号。如果没有波形或波形不好，应调整调频单元的 4W1 和鉴频单元的 4W3。

⑤将示波器CH1接调制信号源4P1，CH2接鉴频输出4TP5，比较两个波形有何不同。改变调制信号源的幅度，观测鉴频器解调输出有何变化。调整调制信号源的频率，观测鉴频器输出波形的变化。

四. 实验报告要求

1. 根据实验数据，在坐标纸上画出静态调制特性曲线，说明曲线斜率受哪些因素影响。
2. 说明 4W1 对于调频器工作的影响。
3. 总结由本实验所获得的体会。

实验 9 调频波的解调（斜率鉴频与相位鉴频器）

9-1 调频波解调工作原理

一. 调频波解调的方法

从调频波中取出原来的调制信号，称为频率检波，又称鉴频。完成鉴频功能的电路称为鉴频器。

在调频波中，调制信号包含在高频振荡频率的变化量中，所以调频波的解调任务就是要求鉴频器输出信号与输入调频波的瞬时频移成线性关系。

鉴频器实际上包含两个部分，第一是借助谐振电路将等幅的调频波转换成幅度随瞬时频率变化的调幅调频波，第二是用二极管检波器进行幅度检波，以还原出调制信号。

由于信号的最后检出还是利用高频振幅的变化，这就要求输入的调频波本身“干净”，不带有寄生调幅。否则，这些寄生调幅将混在转换后的调幅调频波中，使最后检出的信号受到干扰。为此，在输入到鉴频器前的信号要经过限幅，使其幅度恒定。

因此，调频波的检波，主要是限幅器和鉴频器两个环节，可用图 9-1 (a) 的方框图表示。其对应各点的波形如图 9-2 (b) 所示。

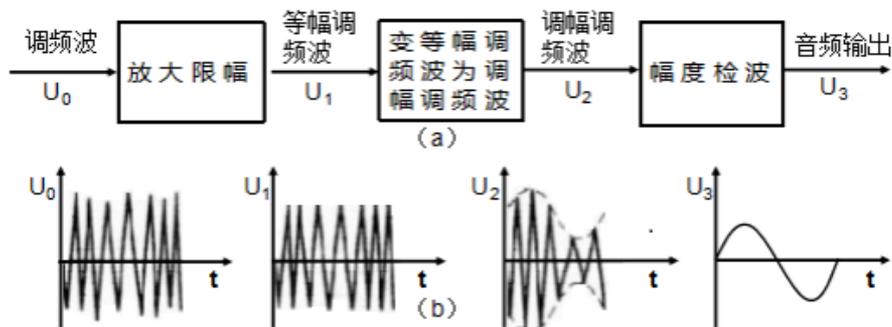


图 9-1 调谐波的检波

有的鉴频器（如比例鉴频器），本身具有限幅作用，则可以省掉限幅器。

鉴频器的类型很多，根据它们的工作原理，可分为斜率鉴频器、相位鉴频器、比例鉴频器和脉冲计数式鉴频器。下面我们只介绍斜率鉴频器。

二. 斜率鉴频器

斜率鉴频是由失谐单谐振回路和晶体二极管包络检波器组成，如图 9-2 所示。其谐振电路不是调谐于调频波的载波频率，而是比它高或低一些，形成一定的失谐。由于这种鉴频器是利用并联 LC 回路幅频特性的倾斜部分将调频波变换成调幅调频波，故通常称它为斜率鉴频器。

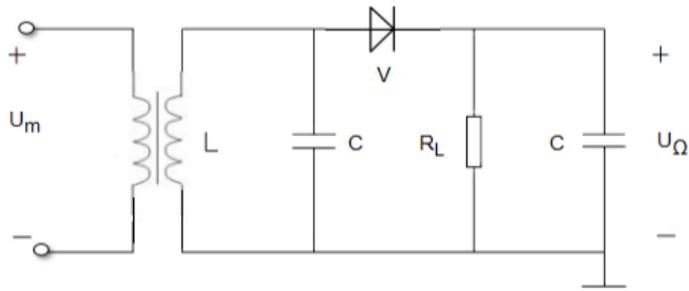


图 9-2 斜率鉴频器电路

在实际调整时，为了获得线性的鉴频特性曲线，总是使输入调频波的中心频率处于谐振特性曲线中接近直线段的中点，如图 9-3 所示 M （或 M' ）点。这样，谐振电路电压幅度的变化将与频率成线性关系，就可将调频波转换成调幅调频波。再通过二极管对调幅波的检波，便可得到调制信号 U_Ω 。

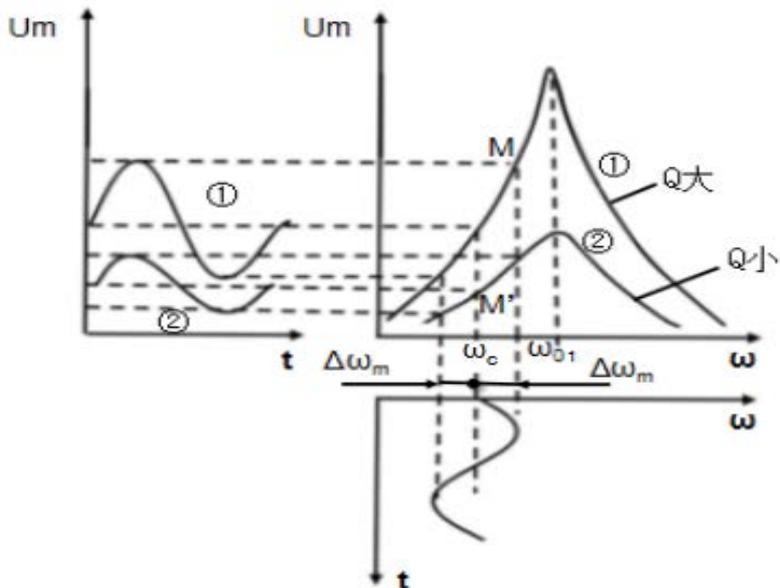


图 9-3 斜率鉴频器的工作原理

斜率鉴频器的性能在很大程度上取决于谐振电路的品质因数 Q 。图 9-3 上画出了两种不同 Q 值的曲线。由图可见，如果 Q 低，则谐振曲线倾斜部分的线性较好，在调频转换为调幅调频过程中失真小。但是，转换后的调幅调频波幅度变化小，对于一定频移而言，所检得的低频电压也小，即“鉴频灵敏度”低。反之，如果 Q 高，则鉴频灵敏度可提高，但谐振曲线的线性范围变窄。当调频波的频偏大时，失真较大。图 9-3 中曲线①和②为上述两种情况的对比。

应该指出，该电路的线性范围与灵敏度都是不理想的。所以斜率鉴频器一般用于质量要求不高的简易接收机中。

三. 调频制和调幅制的比较

和调幅制相比，调频制有许多优点。严格的分析需要进行繁琐的数学推导，我们直接讲述几点结论。

1. 当调频指数 m_f 较大（比如 $m_f > 3$ ）时，调频制的抗干扰及噪声性能比调幅制强得多。
2. 调频制的解调信号音质比调幅制好得多。
3. 调频制的缺点是信号频带较宽，因此只适合超短波波段。

9-2 调频波解调实验电路

图 9-4 为斜率鉴频与相位鉴频器实验电路。图中，4K1 开关打向“1”和“4”时为斜率鉴频。4Q4 用来对 FM 波进行放大，4L4 和 4C19 组成的回路为频率振幅转换网络，其中中心频率为 6.3MHz 左右。4D7 为包络检波二极管。

当开关 4K1 拨向“3”和“6”时为相位鉴频器，相位鉴频器由频相转换电路和鉴相器两部分组成。即它有两个谐振回路，初级回路由 4C15 和 4L3 组成，次级回路由 4L4 和变容管 4C19 组成。初级和次级都调谐在中心频率 6.3MHz 上。初级回路电压 U_1 直接加到次级回路中的串联电容 4C16、4C17 的中心点上，作为鉴相器的参考电压；同时， U_1 又经变容管 4D5、4D6 组成的电容耦合到次级回路，作为鉴相器的输入电压，即加在 4L4 两端。鉴相器采用两个并联二极管检波电路。检波后的低频信号经 RC 滤波器输出。

图中 4W5 用来调整耦合电容的大小。4Q5 用来对检波后的信号进行放大。4P3 为鉴频输入口，4P5 为鉴频输出，4TP5 为输出测量点。4TP4 为调频信号放大测量点，4P6 为实验箱扫频仪信号输入接口。如果使用外加扫频仪，扫频仪的输入信号接 4P5，不可接 4P6，否则曲线可能反相。

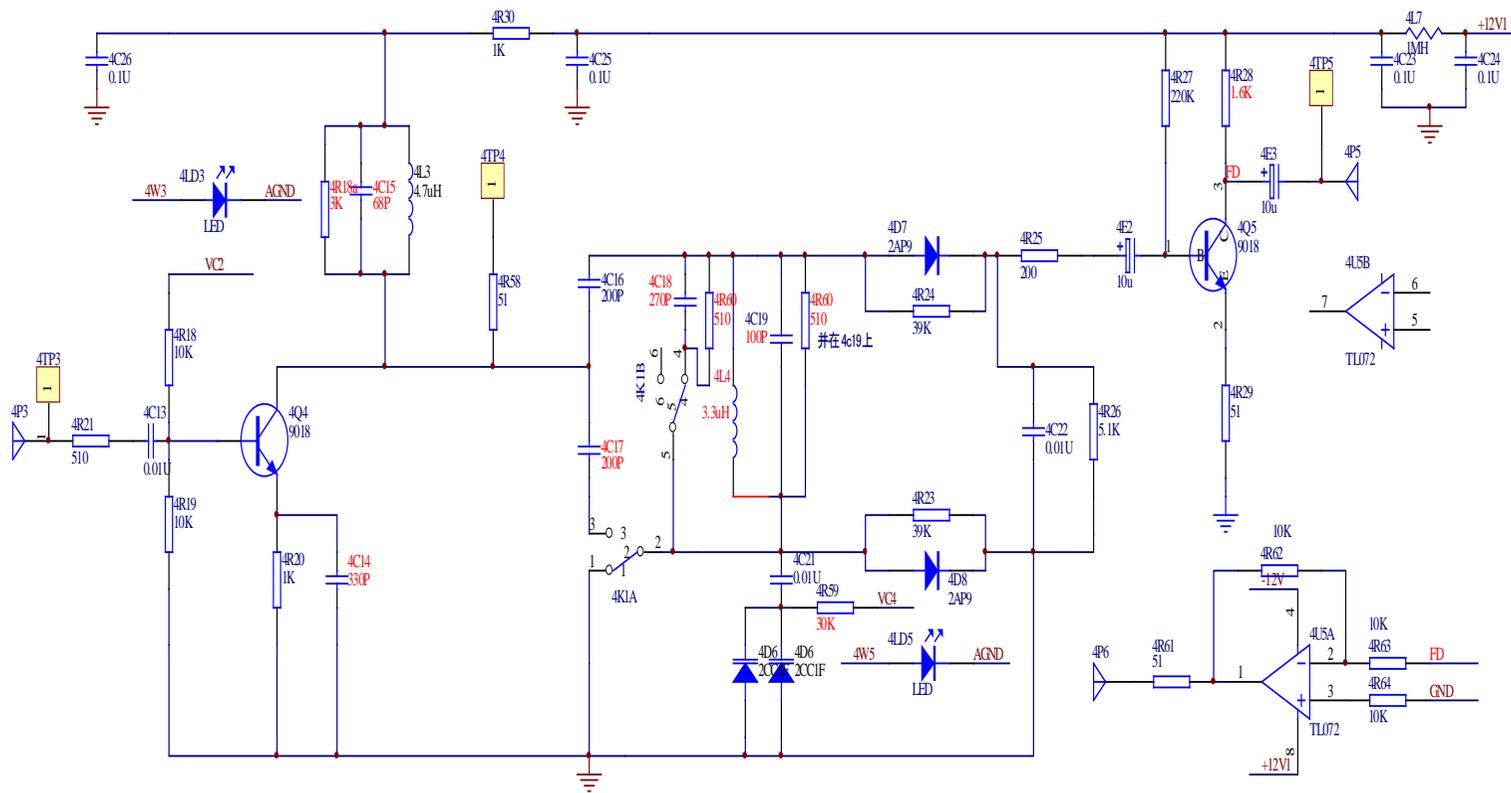


图 9-4 斜率鉴频与相位鉴频器实验电路

9-3 调频波解调实验目的、内容和步骤

一、实验目的

1. 了解调频波产生和解调的全过程以及整机调试方法，建立起调频系统的初步概念；
2. 了解斜率鉴频与相位鉴频器的工作原理；
3. 熟悉初、次级回路电容、耦合电容对于电容耦合回路相位鉴频器工作的影响。

二、实验内容

1. 调频-鉴频过程观察：用示波器观测调频器输入、输出波形，鉴频器输入、输出波形；
2. 观察初级回路电容、次级回路电容、耦合电容变化对FM波解调的影响。

三、实验步骤

1. 实验准备

插装好变容管调频和相位鉴频模块，接通实验箱电源，模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。

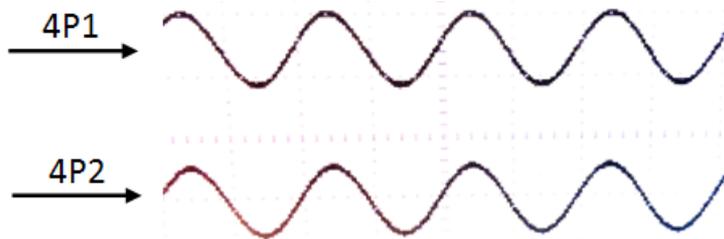
点击显示屏，选择“实验系统”中的“高频原理实验”，然后再选择“鉴频器实验”，显示屏会显示鉴频器原理实验图，图中的可调电位器可点击元件和旋转编码器 4SS1 来调整。

2. 相位鉴频实验（该实验与实验8的内容有部分重复）

(1) 以实验8中的方法产生FM波，即音频调制信号频率为2KHZ，电压峰-峰值1V，加到4P1音频输入端，并将调频输出中心频率调至6.3MHZ左右，然后将其输出4P2连接到鉴频单元的输入端4P3。将鉴频器单元开关4K1拨向相位鉴频。

用示波器观察鉴频输出(4P5)波形，此时可观察到频率为2kHz的正弦波。如果没有波形或波形不好，应调整4W1、4W3和4W5。建议采用示波器作双线观察：CH1接调频器输入端4P1，CH2接鉴频器输出端4P5，并作比较。

实际观察到的波形如下图：



(2) 若改变调制信号幅度，则鉴频器输出信号幅度亦会随之变大，但信号幅度过大时，输出将会出现失真。

(3) 改变调制信号的频率，鉴频器输出频率应随之变化。将调制信号改成三角波和方波，再观察鉴频输出。

3. 斜率鉴频实验

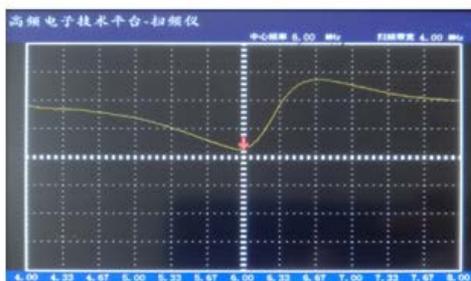
(1) 将鉴频单元开关 4K1 拨向斜率鉴频。

(2) 信号连接和测试方法与相位鉴频完全相同，但音频调制信号幅度应增大到 $V_{p-p}=2V$ 。

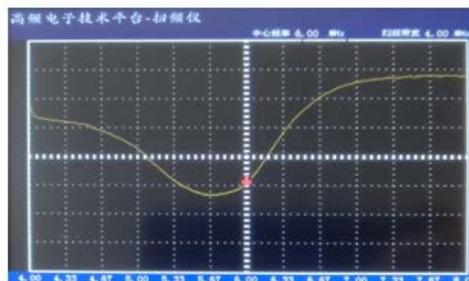
4. 用扫频仪测量鉴频特性曲线

在显示屏上点击选择扫频仪，显示屏下方的高频信号源（此时为扫频信号源）与鉴频输入（4P3）相连，显示屏下方的“扫频”输入与鉴频器输出（4P6）相连。此时显示屏上会显示出鉴频特性曲线。分别测出相位鉴频和斜率鉴频特性曲线。如果特性曲线不理想，应调整 4W3（注意按动 4SS1 编码器使 4W3 指示灯亮，然后再调整），使鉴频特性曲线为最佳状态。

用扫频仪测试的鉴特性曲线如下图：



相位鉴频特性曲线



斜率鉴频特性曲线

四. 实验报告要求

1. 画出调频-鉴频系统正常工作时的调频器输入、输出波形和鉴频器输入、输出波形。
2. 总结由本实验所获得的体会。

实验 10 自动增益控制 (AGC)

10-1 自动增益控制基本原理

接收机在接收来自不同电台的信号时，由于各电台的功率不同，与接收机的距离又远近不一，所以接收的信号强度变化范围很大，如果接收机增益不能控制，一方面不能保证接收机输出适当的声强度，另一方面，在接收强信号时易引起晶体管过载，即产生大信号阻塞，甚至损坏晶体管或终端设备，因此，接收机需要有增益控制设备。常用的增益控制有人工和自动两种，本实验采用自动增益控制，自动增益控制简称 AGC 电路。

为实现 AGC，首先要有一个随外来信号强度变化的电压，然后用这一电压去改变被控制级增益。这一控制电压可以从二极管检波器中获得，因为检波器输出中，包含有直流成分，并且其大小与输入信号的载波大小成正比，而载波的大小代表了信号的强弱，所以在检波器之后接一个 RC 低通滤波器，就可获得直流成分。AGC 的原理如图 10-1 所示，这种反馈式调整系统也称闭环调整系统。

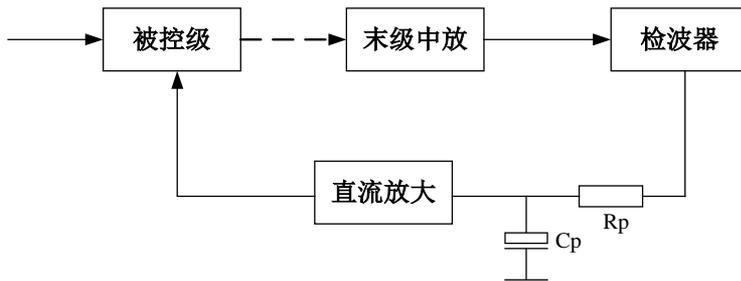


图 10-1 自动增益控制原理方框图

自动增益控制方式有很多种，一般常用以下三种：（1）改变被控制级晶体管的工作状态；（2）改变晶体管的负载参数；（3）改变级间回路的衰减量。

本实验采用第一种方式，其滤波和直流放大电路如图 10-2 所示：

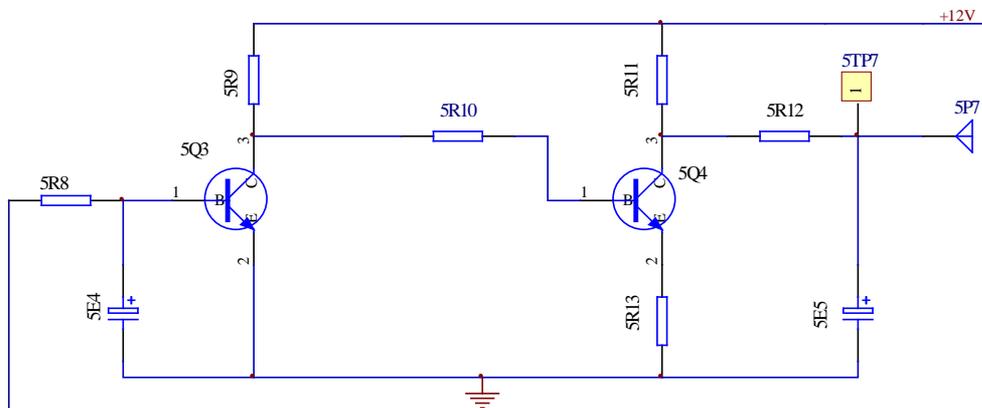


图 10-2 自动增益控制 AGC 电路

图中 5R8、5E4 和 5R12、5E5 为 RC 滤波电路。5Q3、5Q4 为直流放大器。当采用 AGC 时，5P7 应与中频放大器中的 5P2 相连，这样就构成了一个闭合系统。

下面我们分析一下自动增益控制的过程：当信号增大时，中放输出幅度增大，使得检波器直流分量增大，自动增益控制（AGC）电路输出端 5P7 的直流电压增大。该控制电压加到中放第一级的发射极 5P2，使得该级增益减小，这样就使输出基本保持平稳。

10-2 自动增益控制实验内容和步骤

一. 实验内容

1. 不接 AGC, 改变中放输入信号幅度, 用示波器观察中放输出波形;
2. 接通 AGC, 改变中放输入信号幅度, 用示波器观察中放输出波形;
3. 改变中放输入信号幅度, 用三用表测量 AGC 电压变化情况。

二. 实验步骤

1. 实验准备

插装好中放 AGC 与二极管检波模块, 接通实验箱电源, 模块上电源指示灯和运行指示灯闪亮。

2. 控制电压的测试

高频信号源设置频率为 2.5MHZ, 其输出与中频放大器的输入 (5P1) 相连, 中放输出与二极管检波器输入相连 (5P5 与 5P6 相连)。

用三用表直流电压档或示波器直流位测试 AGC 的控制电压输出 (5P7), 改变高频信号源的输出幅度, 观察 AGC 控制电压的变化。可以看出当高频信号源幅度增大时, AGC 控制电压也增大。

3. 不接 AGC 时, 输出信号的测试

上述步骤 2 的状态因为 AGC 输出没有与中放相连, 即没有构成闭环, 所以 AGC 没有起控制作用。在上述状态中, 用示波器测试中放输出 (5P5) 或检波器输入 (5P6) 波形, 可以看出, 当增大高频信号源输出幅度时, 中放输出随之增大。

4. 接通 AGC 时, 输出信号的测试

在步骤 2 的状态下, 再将 AGC 模块输出 5P7 与中放 5P2 相连, 这样就构成了闭环, 即 AGC 开始起作用。用示波器测试中放输出 (5P5) 或检波器输入 (5P6) 波形。可以看出, 当增大高频信号源输出幅度时 (小于 100mv), 中放输出也随着增大, 当高频信号源幅度继续增大时, 中放输出幅度增加不明显。这说明 AGC 起到了控制作用。

三. 实验报告要求

1. 在实验中测出中放输入信号多大幅度时, AGC 开始起控?
2. AGC 电路中的 RC 滤波的作用是什么?
3. 归纳总结 AGC 的控制过程。

实验 11 调幅发射与接收完整系统的联调

11-1 无线电通信概述

一. 无线电通信系统的组成

无线电通信的主要特点是利用电磁波的空间的传播来传递信息，例如将一个地方的语言消息传送到另一个地方。这个任务是由无线电发射设备、无线电接收设备和发射天线、接收天线等来完成的。这些设备和传播的空间，就构成了通常所说的无线电通信系统，图 11-1 是传送语言消息的无线电系统组成图。

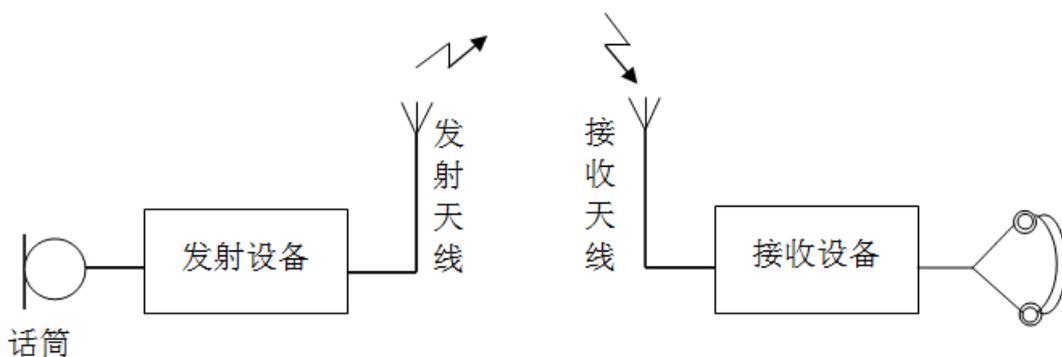


图 11-1

发射设备是无线电系统的重要组成部分，它是将电信号变换为适应于空间传播特性的信号的一种装置。它首先要产生频率较高并且具有一定功率的振荡。因为只有频率较高的振荡才能被天线有效地辐射，还需要有一定的功率才可能在空间建立一定强度的电磁场，并传播到较远的地方去。高频功率的产生通常是利用电子管或晶体管，把直流能量转换为高频能量，这是由高频振荡器和高频功率放大器完成的。

通常是经过转换设备如话筒就是最简单的转换设备，把消息转变成电的信号，这种电信号的频率都比较低，不适于直接从天线上辐射。因此，为了传递消息，就要使高频振荡的某一个参数随着上述电信号而变化，这个过程叫做调制。在无线电发射设备中，消息是“记载”在载波上而传送出去的。

接收设备的功能和发射设备相反，它是将经信道传播后接收到的信号恢复成与发送设备输入信号相一致的一种装置。

将接收天线架设在上述电磁波传播所能到达的地方，则通过电磁感应就会在接收天线上得到高频信号的感应电动势，它加到接收设备的输入端。由于接收天线同时处在其它电台所辐射的电磁场中，因此接收设备的首要任务是从所有信号中选择出需要的信号，而抑制不需要的信号。接收设备另一个任务是将天线上接收到的微弱信号加以放大，放大到所需要的程度。接收设备的最后一个任务是把被放大的高频信号还原为原来的调制信号，例如通过扬声器（喇叭）或耳机还原成原来的声音信号（语言或音乐）。

二. 发信机的组成

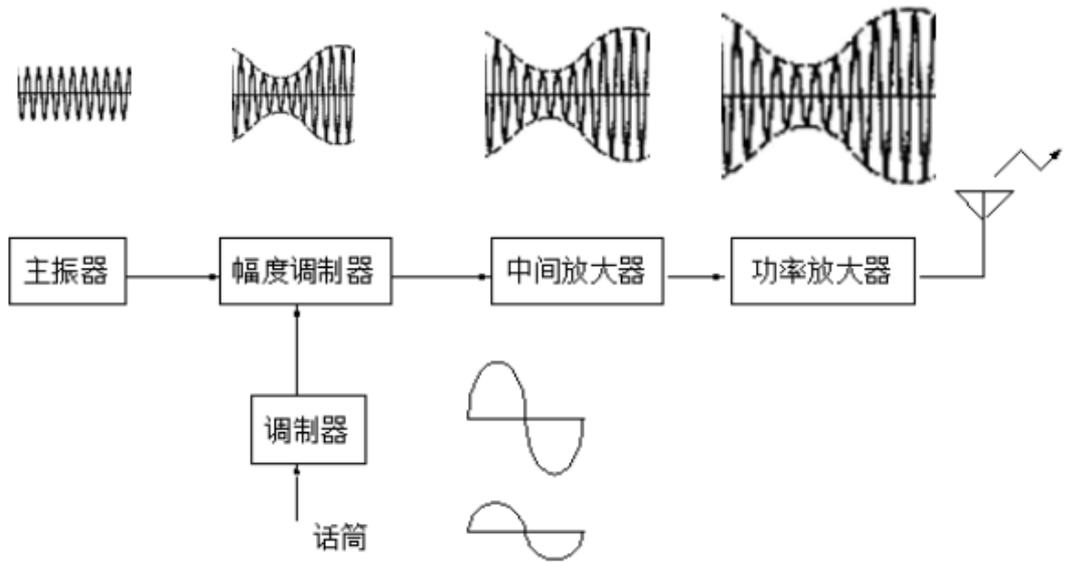


图 11-2

图 11-2 画出了调幅发信机原理方框图，在这个图中，发信机由主振荡器、幅度调制器、中间放大器、功率放大器和调制器组成，电源部分在图上没有画出来。

主振荡器是用来产生最初的高频振荡，通常振荡功率是很小的，由于整个发信机的频率稳定度由它决定，因此要求它具有准确而稳定的频率。幅度调制器是用来产生调幅波，即将调制信号调制到高频振荡频率上。中间放大器的作用是将幅度调制器输出的功率，放大到功率放大器输入端所要求的大小，功率放大器是发信机最后一级，它的主要作用是在激励信号的频率上，产生足够大的功率送到天线上去，同时滤除不需要的频率（高次谐波），以免造成对其它电台的干扰。调制器实际上就是低频放大器，它的作用是将话音或低频信号放大，供给幅度调制器进行调制所需的电压和功率。

图上各处的信号波形反映了上述各部分的工作过程。

三. 接收机的组成

无线电信号的接收过程与发射过程相反，为了提高灵敏度和选择性，无线电接收设备目前都采用超外差式，其组成方框图 11-3 所示。

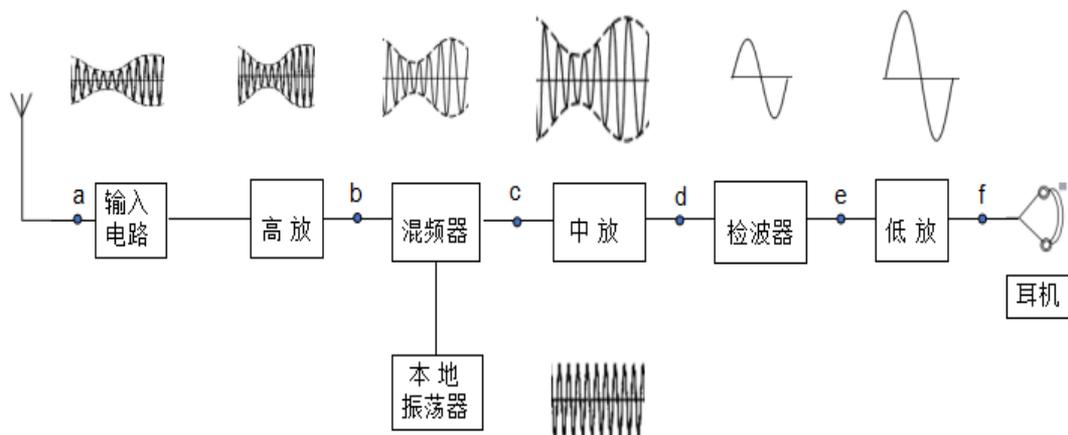


图 11-3

超外差接收机各级的作用和工作物理过程是这样的：

由耦合谐振回路构成的“输入电路”，依靠它的选择性能把住收信机的“大门”，当许多各式各样的电磁波“敲”着收信机的大门时，收信机只选出它所需要的那一种电磁波，让它进来，而其它电磁波都拒之于门外，所以输入电路主要完成选择信号和传输信号。

被输入电路选出的有用信号，馈送到高频放大器的输入端。高频放大器是由器件和谐振回路组成的，器件（如晶体管或电子管）具有放大信号的能力，而回路具有进一步选择信号的能力，所以高频放大器同时担负着选择和放大信号的双重任务。

经过高频放大器放大的了的信号，馈送给混频器，同时由一个专门设置的本机振荡器也将高频能量馈送给混频器。按照需要，我们使信号频率始终和本机振荡器的频率相差一个固定的差值——中频，则经过混频器的非线性作用后就可产生一个新频率——中频。本来，高频放大器是波段工作的，例如 1.5-30MHz，经过混频器的频率变换之后就变成频率固定不变而且较低的中频频率了，例如 465KHz。频率低而且固定，则不仅谐振回路的选择性能好了，同时放大能力也大大提高了，所以超外差收信机的性能很好。

中频放大器也叫频带放大器，它是由器件和耦合谐振电路共同组成的。对接收机的主要性能它起着很重要的作用。到此为止，收信机基本完成了对信号的选择作用。

但是所收信号还是一些已调制的中频振荡信号，必须把“载”在中频振荡上面的反映原调制的音频成分取出来，并滤除中频载波成分，这个任务是由检波器来完成的。

最后，将检波器输出的音频信号进行放大，直到达到足够的输出功率以推动耳机或扬声器发出声音为止。这就是超外差接收机的工作物理过程。图上各点的信号波形也反映了各部分的工作过程。

11-2 调幅发送部分联试实验

一. 实验目的

1. 掌握模拟通信系统中调幅发射机组成原理，建立系统概念；
2. 掌握系统联调的方法，培养解决实际问题的能力。

二. 调幅发射机连接图

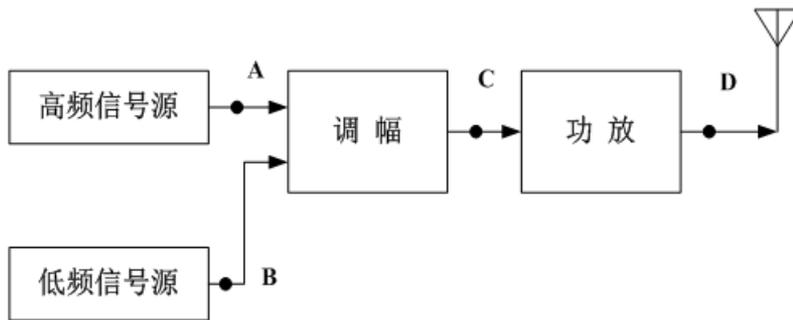


图 11-4 调幅发射机连接图

图中高频信号源相当于图 11-2 中的主振器，低频信号源相当于调制器，图 11-2 中的中间放大器，相当于功率模块中的第一级放大器，高频信号源的频率按功放模块上标注的频率设置，作为发射机的载波。低频信号源可设置为 1KHZ，或音乐信号。经调幅后送入功放，经功放放大后通过天线发射出去。

三. 实验步骤

1. 按图 11-4 连接图插好所需模块，用铆孔线将各模块输入输出连接好，接通各模块电源；
2. 将高频信号源频率设置为 6.3MHZ，低频信号源频率设置为 1KHz；
3. 用示波器测试各模块输入输出波形，并调整各模块可调元件使输出达最佳状态；
4. 改变高频信号源输出幅度和低频信号源输出幅度，观看各测量波形的变化。

11-3 调幅接收部分联试实验

一. 实验目的

1. 掌握模拟通信系统中调幅接收机组成原理，建立系统概念；
2. 掌握系统联调的方法，培养解决实际问题的能力。

二. 调幅接收机连接图

图11-5是调幅接收机各模块连接图。

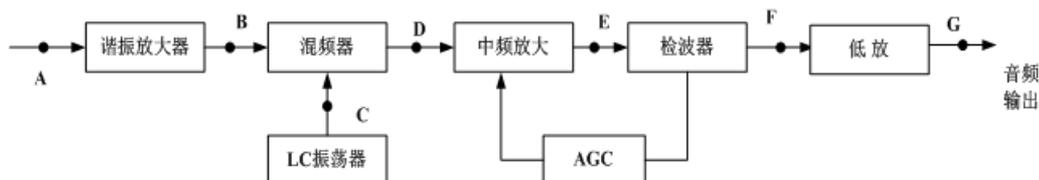


图 11-5 调幅接收连接图

图中谐振放大器采用无线接收与小信号放大器模块，混频器采用晶体三极管混频器混频，LC振荡器可以用晶体振荡器，也可以用LC振荡器但频率要调到8.8MHz，图中的检波器、低放和AGC在同一模块上，即中放AGC与二极管检波模块。

在做该实验时，我们先不用发射机发出的信号，而直接用集成乘法器幅度调制电路产生的调幅波送到谐振放大器输入端，幅度调制模块上的载波设置为6.3MHz，音频信号设置为1KHz的正弦波。输出的调幅波幅度为100mV左右。调幅波经谐振放大器放大后送入混频，经混频输出2.5MHz的调幅波送入中放，中频放大后经检波得到与高频信号源中调制信号相一致的低频信号，该低频信号送入底板上喇叭输入端即可在扬声器中听到声音。

三. 实验步骤

1. 按图11-5连接，插好所需模块，用铆孔线将各模块输入输出连接好，接通各模块电源。
2. 将幅度调制电路的载频设置为6.3MHz，音频设置为1KHz正弦波，调幅波的幅度调整为100mV左右。
3. LC振荡器的频率设置为8.8MHz。
4. 用示波器测试各模块输入输出波形，并调整各模块可调元件，使输出达最佳状态。

11-4 调幅发射与接收完整系统的联调

一. 实验目的

1. 在模块实验的基础上掌握调幅发射机、调幅接收机整机组成原理，建立通信系统的概念；
2. 掌握收发系统的联调方法，培养解决实际问题的能力。

二. 收发系统各模块连接图

1. 方案一：

图 11-6 为方案一收发系统连接图

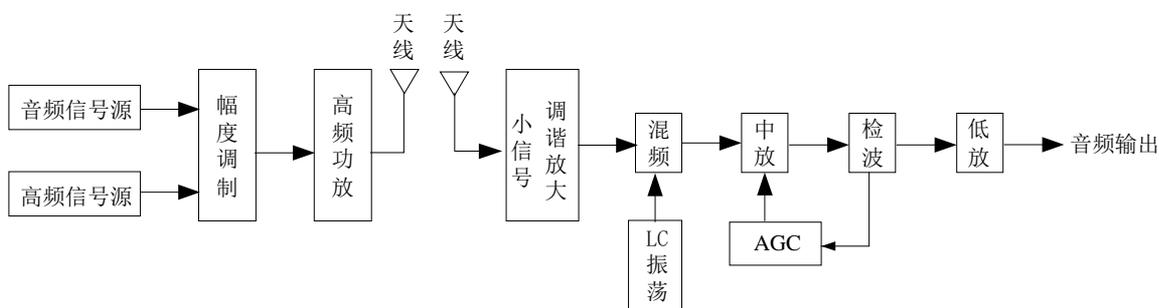


图11-6

该方案为无线收发系统，收、发各为一个实验箱，相距2米左右。该实验在上述发射机和接收机调好的基础上进行，其连接与调整和上述基本相同。所不同的是，接收机接收的信号为发射机发出的信号。

在发射方：高频信号源作为载波，其频率设置为6.3MHz。音频信号源可以是语言，可以是音乐，也可以是固定的单音频。高频信号与音频信号经幅度调制后变为调幅波，然后送往高频功放（注意高频功放模块3K2跳线器要插上），经高频功放放大后，通过天线发射出去。

在接收方：天线上接收到的发方发出的信号，然后送往小信号调谐放大器（调谐回路谐振放大器模块），小信号调谐放大器的频率应与发方频率一致，接收到的信号经放大后送往混频，混频器采用晶体三极管混频，送往混频器的本振信号可以用LC振荡器，也可以采用晶体振荡器，其频率设置为8.8MHz。经混频后输出约2.5MHz的调幅波。中放即为中频放大器，其谐振频率为2.5MHz。图中检波、低放、AGC为同一模块，即中放AGC与二极管检波模块。AGC可接可不接，需要时用连接线与中放（5P2）相连。经检波后输出与发端音频信号源相一致的波形，低放输出的信号送往底板喇叭输入端，通过该部分的扬声器发出声音。

2. 方案二：

图11-7为方案二收发系统连接图

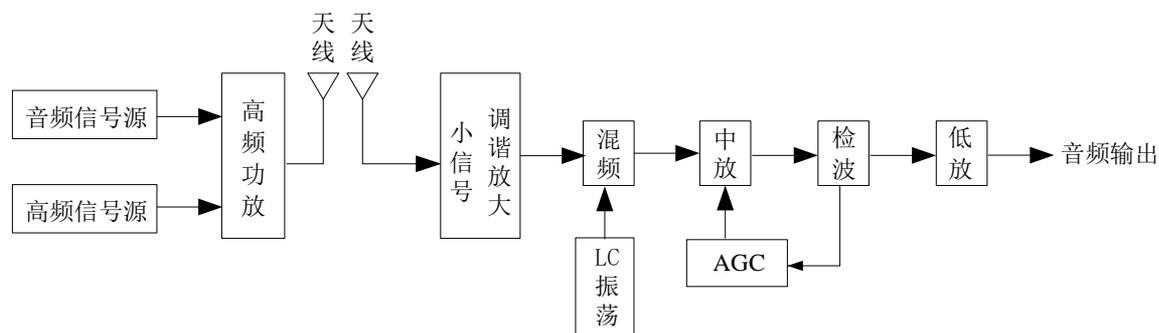


图 11-7

该方案同样为无线收发系统但可在一个实验箱上进行，与方案一基本相同，不同的是发射部分，高频信号源与音频信号源送入高频功放后，在高频功放直接进行调幅，放大后通过天线发射出去。高频信号源的频率同样为 6.3MHz，音频信号源首先选择单音频正弦波（例如 1KHz），待功放调整好后再选择音乐信号或语音信号。在调试时，需要改变高频信号源和音频信号源幅度，使高频功放获得较大的发射功率（注意高频功放模块上 3K2 跳线器要拔掉，使功放工作于丙类状态）和较好的输出波形（不失真）。接收部分与方案一完全相同，不再赘述。

三. 实验步骤

1. 按以上方案联接图插好所需模块，用铆孔线将各模块输入输出连接好，接通各模块电源；
2. 将发方高频信号频率设置为 6.3MHz，低频信号源设置为 1KHz 正弦波；
3. 用示波器测试各模块输入输出波形，并调整各模块可调元件，微调高频信号源的频率及幅度，使输出达最佳状态。

四. 实验报告要求

1. 画出图 11-4 连接图中 A、B、C、D 各点波形；
2. 画出图 11-5 连接图中 A、B、C、D、E、F、G 各点波形；
3. 画出无线收发系统方案中各方框输入输出波形，并标明其频率。
4. 记录实验数据，并作出分析和写出实验心得体会。

实验 12 调频发射与接收完整系统的联调

一. 实验目的

1. 在模块实验的基础上掌握调频发射、调频接收的组成原理，建立调频通信系统的概念；
2. 掌握收发系统的联调方法，培养解决实际问题的能力。

二. 实验内容

完成调频发射、调频接收机的整机联调。

三. 实验电路原理

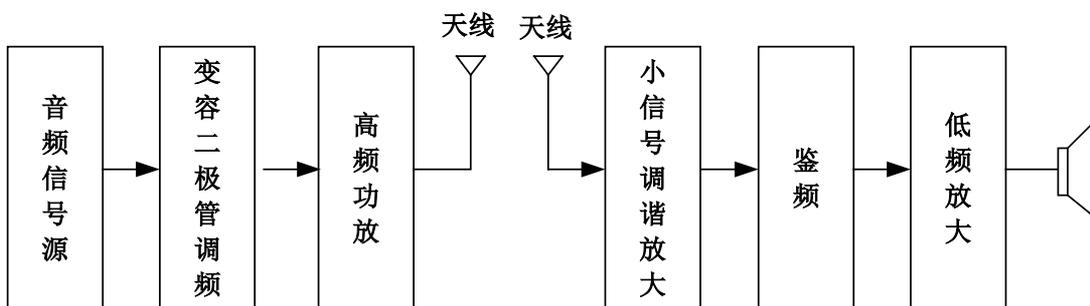


图 12-1 各模块连接图

图 12-1 为简易的调频无线收发系统。该收发系统可在一个实验箱上进行；也可在两个实验箱上进行，在两个实验箱上进行时，一方为发射，一方为接收，但距离在 2 米以内。

图中的音频信号源可由实验箱底板上的低频信号源提供，音频信号可以是语音，可以是音乐信号，也可以是函数发生器产生的低频信号。音频信号源输出的信号对变容二极管调频器进行调频。变容二极管调频器的载频调至 6.3MHz 左右（调整 4W1）。图中的高频功放即为高频功率放大与发射实验模块，其谐振频率约为 6.3MHz。变容二极管调频器输出的调频信号送入高频功放，经放大后通过天线发射出去。接收端的小信号调谐放大器采用无线接收与小信号模块，其谐振频率为 6.3MHz 左右。收到的信号经调谐放大器放大后，直接送往鉴频器进行鉴频，鉴频器采用斜率鉴频或相位鉴频，经鉴频后得到与发端相一致的音频信号，然后送到底板喇叭输入端，最后通过扬声器发出声音。

四. 实验步骤

1. 按图 12-1 插好所需模块，用铆孔线将各模块输入输出连接好，接通各模块电源；
2. 将变容二极管调频器的载频调到为 6.3MHz 左右，低频信号源设置为 1KHz 正弦波（也可设置为音乐信号）。
3. 将高频功率放大与无线发射模块中的开关 3K3 拨向左侧，3K4 与天线接通，并将天线拉好。
4. 将无线接收与小信号放大模块天线拉好，将斜率鉴频与相位鉴频模块中的开关 4K1 拨

向相位鉴频或斜率鉴频。

5. 此时扬声器中应能听到音频信号的声音，如果听不到声音或者失真，可微调变容二极管调频器的频率，以及调整调谐回路谐振放大器和鉴频器的电位器。

6. 用示波器测试各模块输入输出波形，并调整各模块可调元件，使输出达最佳状态。

五. 实验报告要求

1. 画出图 12-1 各方框输入输出波形，并标明其频率。

2. 记录实验数据，并作出分析和写出实验心得体会。