



EXPERIMENT GUIDE BOOK | **实验指导书**

百科荣创（北京）科技发展有限公司
高频电路实验系统

前 言

高频电路实验系统旨在为您提供一个全面的高频电子学实验平台,让您能够深入了解和应用高频范围内的电子学原理和技术。通过这个实验箱,您将有机会探索通信、雷达、微波、射频电子学等领域,提升您的实验技能和理论知识。本系统采用、模块化设计架构,整体划分为多个实验模块,每个模块包含多个单元实验电路,既可完成单个实验又可积木式组合搭建实验。所有模块采用半接线半开放式设计,预留可调参旋钮与必要的接线、测试端子,引导学生自主动手搭建完成实验实训。系统搭配基础实验模块和综合应用模块,以电路原理图为引领,可自主搭建完成实验,培养电路分析能力。能够满足《高频电子技术》专业基础理论课程相配合的实验实训课程教学。

高频电子技术实验内容极其丰富,涉及的知识面很广,并且还在不断充实、更新。在整个实验过程中,对于示波器、信号发生器等常用电子仪器的使用方法;频率、相位、时间、脉冲波形参数和电压、电流的平均值、有效值、峰值以及各种电子电路主要技术指标的测试技术;常用元器件的规格与型号,手册的查阅和参数的测量;小系统的设计、组装与调试技术,以及实验数据的分析、处理能力等,都是需要着重掌握的。

本实验指导书主要对高频电子基础实验案例进行讲解,通过实验嵌入知识点让读者能够在学中做,做中学充分掌握知识点。实验内容注重过程,能够不断增强动手与电路分析能力,夯实理论基础。

本实验指导书虽然在主观上力求谨慎从事,但限于时间和编者的学识、经验,疏漏之处,在所难免。恳请广大读者不吝赐教以便今后修改提高。

为了给您提供更加优质的服务,公司设有400开头的免费电话,在使用过程中,如果您有任何问题需要咨询或者需要服务,请与本公司相关部门联系,我们定当竭诚为您服务。服务电话:400-067-7899。

欢迎您使用的过程中为我们提出宝贵的意见和建议。

目 录

第1章 高频电路实验系统简介	1
1.1 高频电子技术	1
1.2 高频电路实验系统的组成	3
1.3 高频电路实验系统说明	4
1.4 高频信号源使用说明	5
1.5 函数信号发生器使用说明	5
1.6 设备使用说明注意事项	7
第2章 高频电子实验	8
2.1 高频信号发生实验	8
2.2 音频放大电路实验	11
2.3 LC 三点式振荡电路实验	14
2.4 晶体振荡电路实验	19
2.5 单调谐回路振荡放大器实验	22
2.6 高频谐振功率放大电路实验	27
2.7 平衡调幅电路实验	30
2.8 集电极调幅电路实验	37
2.9 二极管开关混频器电路实验	40
2.10 集成电路混频实验	43
2.11 调幅同步检波电路实验	47
2.12 幅度调制系统实验	52
2.13 调幅峰值包络检波电路实验	59
2.14 变容二极管调频电路实验	64
2.15 集成斜率鉴频实验	68
2.16 二次变频与鉴频电路实验	73
2.17 锁相环鉴频实验	77
2.18 锁相环倍频实验	82
2.19 小功率调频发射机电路实验	86

2.20 调频接收机电路实验	89
第3章 附录	92
附录 I 常用测量仪器仪表简介	92

第1章 高频电路实验系统简介

1.1 高频电子技术

高频电子技术是电子工程中的一个重要领域，主要涉及处理高频信号和电磁波的技术和应用。这个领域包括广泛的主题，涉及到从射频（Radio Frequency, RF）到微波（Microwave）和毫米波（Millimeter Wave）频段的各种频率范围。高频电子技术在通信、雷达、卫星通信、移动通信、射频识别（RFID）、天线设计、微波炉、医学成像等众多领域中发挥着重要作用。

高频电子线路实验系统适用于高等院校电子和通信专业《高频电子线路》、《通信电子线路》课程的实验教学，采用完全开放性设计，单元实验和系统实验并重，学生可自由组合编排实验，能充分锻炼学生的系统设计能力和电路调试能力，完全能满足本课程的课程设计使用。



图 1.1.1 高频电路实验系统实物图

➤ 系统特色

- 系统采用模块化设计，实验组合编排搭接灵活；
- 实验频率高达 12MHz，采用真正的高频信号进行高频电路实验；
- 自带稳压电源和扩展接口，实验扩展方便灵活。每个单元电路模块有独立的电源开关，在做实验时只需要打开所用实验模块的电源，以避免各电路模块间的相互串扰，从而提高了系统的稳定性和可靠性；

- 采用贴片元件按高频工艺生产，并采用屏蔽连接导线及接插件，使系统性能更加稳定可靠；
- 单元电路实验与系统实验并重，可加强学生的系统联调能力和设计能力；
- 系统自带实验所需高、低频信号源，易于设备管理，并为用户节约了实验设备的投资；
- 系统自带音频功放电路，实验生动直观，方便用户搭建各种语音通信系统。

1.2 高频电路实验系统的组成

RC-GP-III 型高频电路实验箱的实验内容以目前大多数学校开设的《高频电子路线》实验为基本内容而设计的。实验箱操作面板如图 1.2.1 所示, 主要由: 开关稳压电源、高频信号源、低频函数发生器、音频功率放大器等十六个实验模块组成, 可以完成十六个实验, 实验内容基本含盖了《高频电子路线》课程的基本内容。

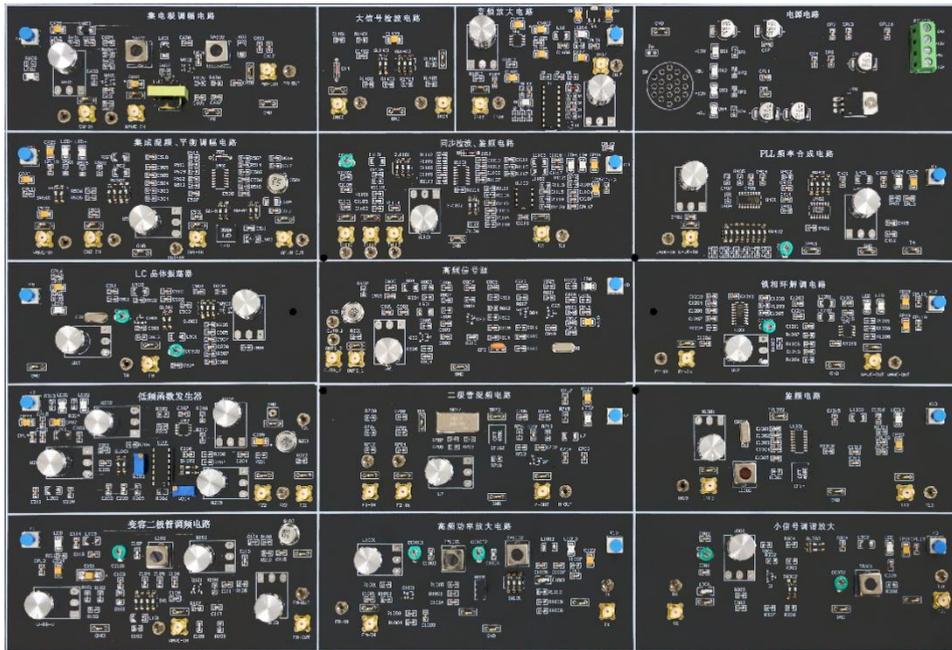


图 1.2.1 高频电路实验系统实验面板

本系统配备实验清单如下:

- | | |
|------------------|----------------------|
| 1. 单调谐回路调谐放大器实验; | 9. 变容二极管调频电路实验; |
| 2. 二极管开关混频器实验; | 10. 集成电路混频电路实验; |
| 3. 高频谐振功率放大器实验; | 11. 平衡调幅电路实验; |
| 4. 二次变频与鉴频实验; | 12. 同步检波电路实验; |
| 5. LC 三点式振荡器实验; | 13. 锁相环解调电路实验; |
| 6. 晶体振荡器实验; | 14. PLL 频率合成器倍频电路实验; |
| 7. 集电极调幅电路实验; | 15. 小功率调频发射机电路实验; |
| 8. 大信号检波电路实验; | 16. 调频接收机电路实验。 |

通过这些电路, 可以满足课程的实验要求、帮助学生理解和加深课堂所学的内容, 而且可以组成复杂的调频无线收发信系统, 使学生了解一个复杂的无线收发系统的组成原理及组成过程中应注意的事项, 也可以在自行开发相关实验时作参考。

1.3 高频电路实验系统说明

1. 实验箱的电源开关位于实验箱体右侧的右上角，闭合电源开关，各电源对应的指示灯亮，包括：12V、5V，根据这些指示灯，可以判断实验箱电源是否正常；

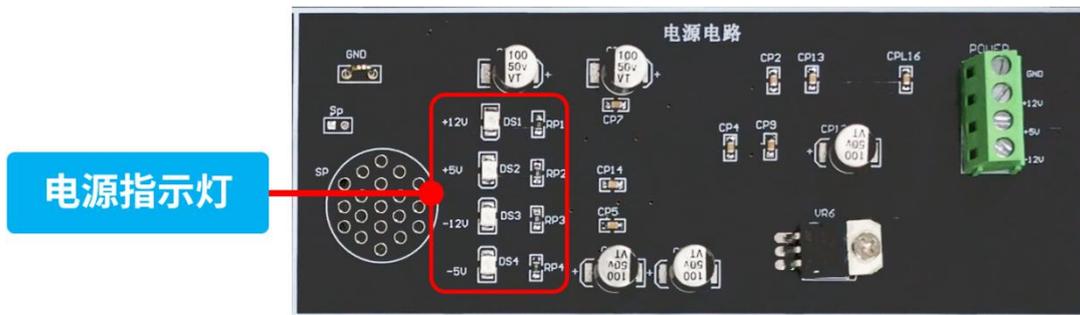


图 1.3.1 电源指示

2. 每个实验模块均有独立的电源开关



图 1.3.2 功能电路独立电源开关

3. 使用注意事项

- (1) 实验之前必须充分预习，掌握各实验的理论知识；
- (2) 认真阅读实验指导书，掌握好实验所需的有关电路原理；
- (3) 了解实验中所用仪器的使用方法和注意事项；
- (4) 调节可变电容或中周时应使用无感起子；
- (5) 实验中应细心操作，仔细观察实验；
- (6) 实验中如发现异常现象，应立即关闭电源，并报告指导老师；
- (7) 认真填写实验报告；
- (8) 实验结束后，必须关闭电源，整理好仪器、设备、工具和实验导线。

1.4 高频信号源使用说明

高频信号源为实验箱提供 10.7MHz 的载波信号。载波主要用于小信号调谐放大单元、高频谐振功率放大器单元、集电极调幅单元、模拟乘法器部分的平衡调幅及混频单元和二极管开关混频单元。调 W81 可调节输出幅度。

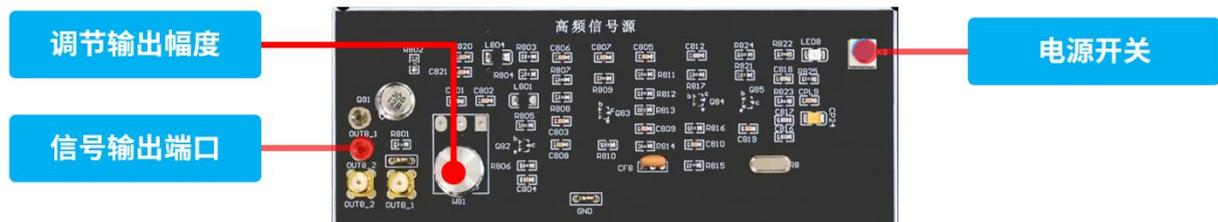


图 1.4.1 高频信号源

1.5 函数信号发生器使用说明

低频函数发生器包括两个频段：500Hz~2kHz 和 20kHz~200kHz，均可输出方波、三角波和正弦波信号。

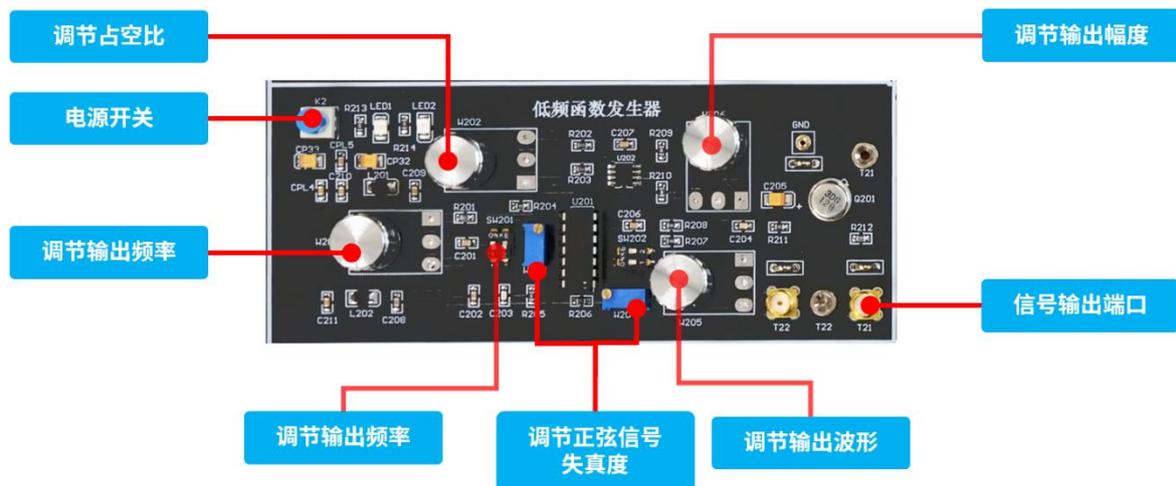


图 1.5.1 低频函数发生器功能示意图

低频函数发生器可以作为变容二极管调频电路、平衡调幅电路、集电极调幅电路和 高频信号源的调制信号源，也可以作为锁相频率合成单元输入信号源。

低频函数发生器的使用方法如下：

- W201 调节输出频率；
- W203、W204 可以使输出正弦波信号失真最小；
- W202 可以调节输出方波信号的占空比；
- W206 调节输出正弦波信号的幅度，由 T21 输出；

- SW201 的状态为：“10”时输出低频段 500Hz~2kHz ，SW201 的状态为：“01”时输出高频段 20kHz~200kHz;
- SW202 的状态为：“10”时 T22 输出三角波，调节 W205 改变输出幅度;
- SW202 的状态为：“01”时 T22 输出方波，调节 W205 改变输出幅度，
- 调节 W202 改变占空比，同时也影响三角波和正弦波的倾斜程度。

1.6 设备使用说明注意事项

在使用高频电路实验箱进行实验和测试时，请务必遵循以下注意事项，以确保设备的安全性和有效性：

1. 电源供应：

- 使用符合规范的电源适配器，并确保其输出电压和电流符合实验箱规格。
- 在连接或断开电源时，确保实验箱和相关设备处于关闭状态。

2. 防静电保护：

在操作之前，通过使用静电手环或其他静电防护设备，确保您的身体不会对实验箱内的电子元件造成静电损害。

3. 接地：

- 将实验箱正确接地，以减少电气噪声和提高安全性。
- 在连接天线或其他外部设备时，确保它们也正确接地。

4. 避免过载：

避免超过实验箱和相关设备的额定功率和电流，以防止过热或损坏。

5. 适当的通风：

在长时间使用实验箱时，确保设备周围有足够的通风，以防止过热。

6. 注意频率范围：

在操作实验箱时，确保工作在规定的频率范围内，以防止对设备和其他无线通信系统产生干扰。

7. 谨慎操作天线系统：

在调试和连接天线系统时，确保天线方向正确，以防止不必要的辐射和接收干扰。

8. 谨慎连接和断开：

在连接和断开设备和电缆时，确保在设备和实验箱关闭的情况下进行，以避免电击和设备损坏。

请记住，这些是一般性的注意事项，实验箱的具体使用说明应当根据我司提供的具体手册和指南而定。任何时候，用户都应谨慎操作设备，以确保人身安全和设备的正常运行。

第2章 高频电子实验

2.1 高频信号发生实验

2.1.1 实验分析

1. 掌握高频信号源的电路组成和工作原理。
2. 掌握输出载波信号的调节方法，包括频率和幅度的调节。
3. 观察和分析输出信号的波形特性。

2.1.2 实验原理

将石英晶振作为高Q值谐振回路元件接入正反馈电路中，就组成了晶体振荡器。根据石英晶振在振荡器中的作用原理，晶体振荡器可分成两类：一类是将其作为等效电感元件用在三端式电路中，工作在感性区间，称为并联型晶体振荡器；另一类是将其作为一个短路元件串接于正反馈支路上，工作在它的串联谐振频率上，称为串联型晶体振荡器。

1. 皮尔斯振荡电路

并联型晶体振荡器的工作原理和电容三端式振荡器相同，只是将其中一个电感元件换成石英晶振。石英晶振可接在晶体管c、b极之间或b、e极之间，所组成的电路分别称为皮尔斯振荡电路和米勒振荡电路。皮尔斯电路是最常用的电路之一。相对与电容反馈三端式振荡器，并联了晶体振荡器，将晶体等效为电感。

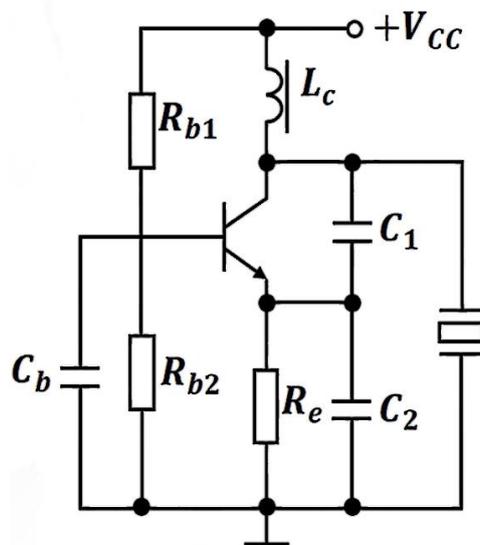


图 2.1.1 皮尔斯振荡器

(1) 高频交流等效电路

- 1) 直流电阻开路: R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_e
- 2) 电感开路: (高频扼流圈 L_c)
- 3) 电容短路:
旁路电容短路(无)
耦合电容短路(C_b)
电源滤波电容短路(无)

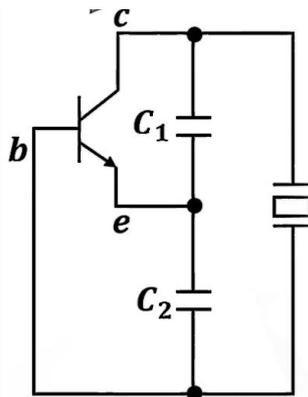


图 2.1.2 皮尔斯振荡器高频等效电路

(2) 特点:

- 1) 振荡回路与晶体管、负载间耦合很弱, 电路中不稳定参数对振荡回路影响很小, 提高回路标准性。
- 2) 振荡频率几乎由石英晶振的参数决定, 石英晶振本身的参数具有高度的稳定性。
- 3) 振荡频率 f_0 一般调谐在标称频率 f_N 上, 位于晶振的感性区间, 电抗曲线陡峭, 稳频性能极好。
- 4) 晶振的 Q 值和特性阻抗 p 都很高 \rightarrow 晶振的谐振电阻也很高(10 的 10 次幂 欧姆以上), 即使外电路接入系数很小, 谐振电阻等效到晶体管输出端的阻抗仍很大。

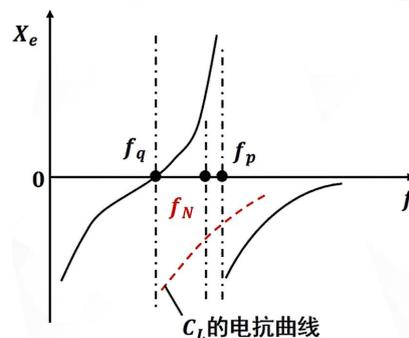


图 2.1.3 电抗曲线

2.1.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）；



2.1.4 实验步骤

1. 实验模块：高频信号源。
2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关。
3. 用示波器 OUT8 观察振荡波形，调节电位器 W81，观察波形的变化情况；

2.1.5 实验扩展

1. 整理实验所测得的数据，并用所学理论加以分析；
2. 比较 LC 振荡器与晶体振荡器的优缺点。

2.2 音频放大电路实验

2.2.1 实验分析

1. 掌握音频功放电路组成和工作原理。
2. 掌握音频信号的调节方法，包括频率和幅度的调节。
3. 观察和分析输出信号的波形特性。

2.2.2 实验原理

1. 音频处理芯片

WTV080 是一款增强型 8 位 DSP 平台，具有 24 个 Poly 可编程声音发生器 (PSG)。E608 系列基于 8 位 MCU (JUPITER)，并配备了强大的可编程声音发生器 (PSG)，用于处理甜美的声音。通过专有系统总线，MCU (JUPITER) 具有高效的寻址寄存器和内存时序控制寄存器 (MTR)，以适当的时序访问内部/外部存储器和 I/O 设备。

E608 配备两个高分辨率 16 位 D/A 音频输出，可支持分时模式，可处理多达 64 个复音声音。已经实现了许多语音处理的固件库，例如 4 位 ADPCM、1 位 WFM 等。由于 E608 内置了 PSG，因此它还提供高质量的标准 MIDI 播放库。

E608 具有 24 个通用 I/O 引脚。每个都可以单独编程为输入或输出模式，以及是否具有内部上拉功能。端口 0 的每个 I/O 都可以编程以选择中断源，并且中断信号可以是下降或上升触发。

E608 具有 VCO 和 PLL 功能，可提供系统时钟。系统时钟的频率可编程高达 45 MHz。该器件具有两个内置的 8 位定时器。每个定时器由一个 8 位向上计数器、8 位重新加载数据和预分频器组成。通常，定时器可用于配置语音采样频率。E608 还支持两个设备接口：一个是 2 线串行总线，另一个是 8 位并行 MCU 控制接口。E608 充当从设备，能够通过两个接口中的任何一个与外部主机控制器通信。

2. 引脚功能

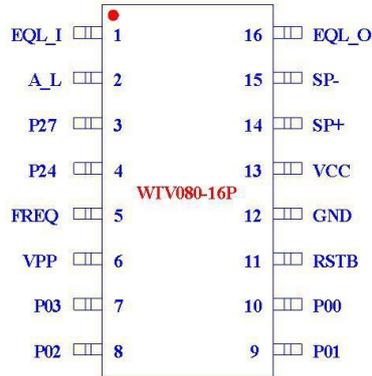
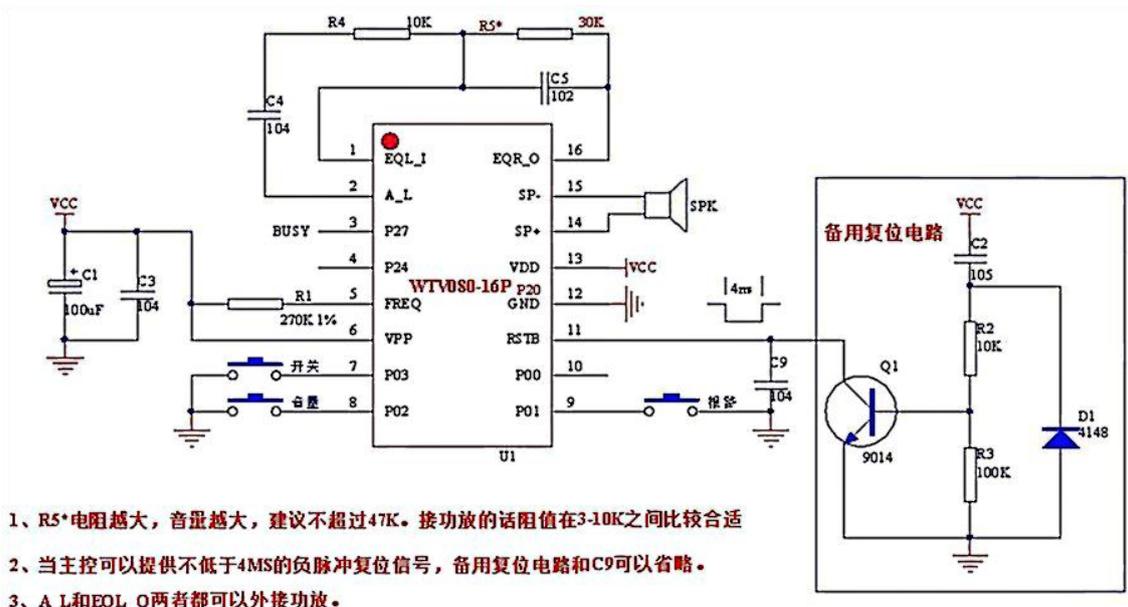


图 2.2.1 WTV080-16P 引脚图

in No.	Designation	I/O	Description
1	EQL_I	I	左集成运放输入负极。
2	A_L	O	左路DAC输出。
3	P27	I/O	P27输入输出。
4	P24	I/O	P24输入输出。
5	FREQ	I	振荡电阻输入。
6	VPP	P	烧录电源正极。
7	P03	I/O	P03输入输出。可唤醒休眠状态。
8	P02	I/O	P02输入输出。可唤醒休眠状态。
9	P01	I/O	P01输入输出。可唤醒休眠状态。
10	P00	I/O	P00输入输出。可唤醒休眠状态。
11	RSTB	I	系统外部复位端口。
12	GND	P	系统电源负极。
13	VCC	P	系统电源正极。
14	SP+	O	喇叭正极输出。
15	SP-	O	喇叭负极输出。
16	EQL_O	O	左集成运放输出。

3. 应用电路



- 1、R5*电阻越大，音量越大，建议不超过47K。接功放的话阻值在3-10K之间比较合适
- 2、当主控可以提供不低于4MS的负脉冲复位信号，备用复位电路和C9可以省略。
- 3、A_L和EQL_O两者都可以外接功放。

图 2.2.2 应用电路

2.2.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）；



2.2.4 实验步骤

1. 实验模块：音频放大模块电路。
2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关。
3. 从 IN16 输入一低频信号(从低频函数发生器 T21 产生),扬声器发出声音,改变信号的频率,声音出随着变化，调节可调电阻查看变化。

2.2.5 实验扩展

1. 整理实验所测得的数据，并用所学理论加以分析；
2. 尝试进行音乐播放。

2.3 LC 三点式振荡电路实验

2.3.1 实验分析

1. 掌握 LC 三点式振荡器电路组成及工作原理;
2. 掌握改进型电容三点式正弦波振荡器性能的测量方法;
3. 了解外界条件变化对振荡频率稳定度的影响;
4. 比较 LC 振荡器和晶体振荡器频率稳定度, 加深对晶体振荡器频率稳定性高的理解。

2.3.2 实验原理

1. LC 正弦波振荡器工作原理

正弦波振荡器是应用非常广泛的电路, 它可以输出接近理想的正弦波。其电路形式主要有三种: RC、LC 和晶体振荡器。本实验主要研究 LC 三点式振荡器及晶体振荡器。LC 三点式振荡器的基本电路如图 2.3.1 所示。

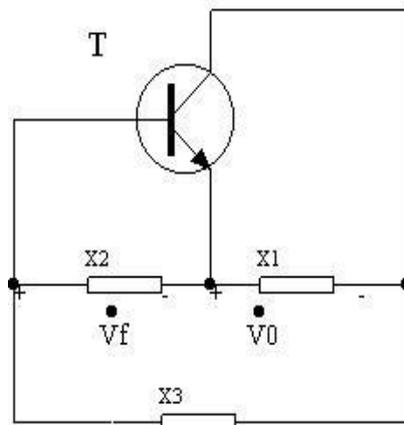


图 2.3.1 三点式振荡器的交流等效电路

振荡电路中有三个电抗元件 X_1 、 X_2 和 X_3 。根据相位平衡条件, X_1 、 X_2 必须为同性质的电抗元件, X_3 必须为异性质的电抗元件, 且它们之间应满足下列关系式:

$$X_3 = -(X_1 + X_2)$$

上式就是 LC 三点式振荡器振荡的相位条件。如果 X_1 和 X_2 为容抗元件, X_3 为感抗元件, 则为电容三点式振荡电路; 若 X_1 和 X_2 均为感抗元件, X_3 为容抗元件, 则为电感三点式振荡器。

2. 晶体管共基组态电容三端式振荡器

晶体管共基组态电容三端式振荡器的基本电路如图 2.3.2 所示。

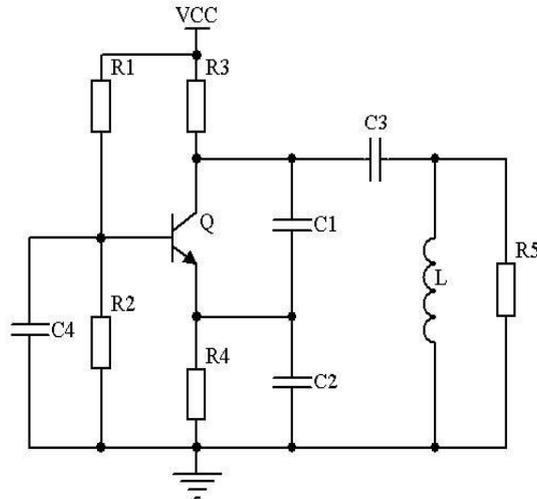


图 2.3.2 晶体管共基组态振荡器

由图可见，与发射极连接的两个电抗元件为同性质的容抗元件 C1 和 C2，与基极连接为两个异性质的电抗元件 C2 和 L。根据 LC 振荡器电路原理，该电路满足相位条件，因此只要该电路满足振幅条件，则产生正弦波，即满足：

$$A_0 \cdot F > 1$$

式中，A0 为电路刚起振时，振荡管工作状态为小信号时的电压增益；F 是反馈系数。

图 2.3.2 的 Y 参数等效电路见图 2.3.3 所示。

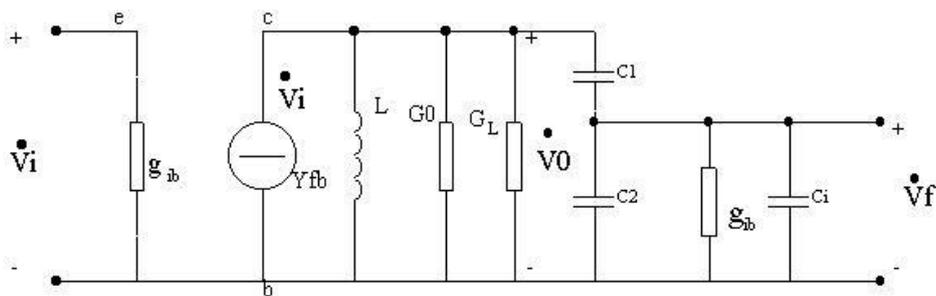


图 2.3.3 LC 振荡电路简化 Y 参数等效电路

根据图 2.3.3 可得电压增益和反馈系数表达式如下：

$$\dot{A}_0 = \frac{\dot{V}_0}{\dot{V}_i} = \frac{-y_{fb}}{Y}$$

$$\dot{F} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_0} = \frac{Z_2}{Z_1 + jx_1}$$

代入元件参数并整理可得：

$$\dot{A}_0 \cdot \dot{F} = -\frac{y_{fb}}{Y} \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + jx_1}$$

$$\dot{F} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_0} = \frac{Z_2}{Z_1 + jx_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2'} = \frac{C}{C_2'}$$

显然, F 增大时, 可以使 $\dot{A}_0 \cdot \dot{F}$ 增加, 但 F 过大时, 由于 g_{ib} 的影响将使增益降低, 反而使 $\dot{A}_0 \cdot \dot{F}$ 减小, 导致振荡器不易起振; 若 F 取得较小, 要保证 $\dot{A}_0 \cdot \dot{F} > 1$, 则要求 Y_{fb} 很大, 因此, 一般将反馈系数取 0.125~0.5 之间。确定了反馈系数 F 之后, 只要求出 A_0 的值, 便可得到电路中其它元件的参数及其关系。

3. 振荡管工作状态对振荡器性能的影响

对于一个振荡器, 当其负载阻抗及反馈系数 F 已经确定的情况下, 静态工作点的位置对振荡器的起振以及稳定平衡状态(振幅大小, 波形好坏)有着直接的影响。一般情况下, 如果工作点偏高, 振荡管工作范围易进入饱和区, 输出阻抗的降低将会使振荡波形严重失真, 严重时, 振荡器停振; 如果工作点偏低, 靠近截止区, 不易起振。实际中, 为了使小功率振荡器的效率高, 振幅稳定性好, 一般都采用自给偏压电路, 在振荡器起振之前, 直流自偏压取决于静态电流 I_{EO} 和 R_e 的乘积, 即:

$$V_{BEQ} = V_B - I_{EQ} \cdot R_e$$

为了使振荡器容易起振, 振荡器工作点都选得很低, 起始自偏压也较小。振荡过程如下: 在起振之初, 振幅迅速增大, 当反馈电压 U_f 对基极为正半周时, 基极上的瞬时偏压 $U_{be} = U_{beq} + U_f$ 变得更正, i_c 增大, 电流通过振荡管向 C_e 充电; 当 U_f 为负半周, 偏置电压减小, 甚至成为截止偏压, 这时, C_e 上的电荷将通过 R_e 放电, 放电的时间常数为 $\tau_{放} = R_e \cdot C_e$ ($\tau_{放} \gg \tau_{充}$), 在 U_f 的一周期内, 积累电荷比释放的多, 所以随着起振过程的不断增强, 即在 R_e 上建立起紧跟振幅强度变化的自偏压, 经若干周期后达到动态平衡, 在 C_e 上建立了一个稳定的平均电压 $I_{EO} \cdot R_e$, 振荡管 BE 之间的电压为。

$$V_{BEO} = V_B - I_{EO} \cdot R_e$$

因为 $I_{EO} > I_{EQ}$, 所以有 $U_{BEO} < U_{BEQ}$, 可见振荡管 BE 间的偏压减小, 振荡管的工作点向截止方向移动。也就是说, 起振之初振幅较小, 振荡管工作在甲类状态, 自偏压变化不大, 随着正反馈作用, 振幅迅速增大, 进入非线性工作状态,

自偏压急剧增大, 使 U_{BE} 变为截止偏压。振荡管的非线性工作状态, 反过来又限制了振幅的增大。因此, 只要适当选取 R_e 和 C_e 的数值, 自偏压就能适时地紧跟振幅的大

2.3.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）；



2.3.4 实验步骤

1. 实验模块：LC 晶体振荡器。
2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关，打开 LC 晶体振荡器电源开关 K9，将拨码 SW901 置为“01”。
3. 用示波器在 T9 观察振荡波形，调节电位器 W91，观察 T9 处波形的变化情况，测量当时的发射极电压，计算当时的 I_E （通过测量 R905 两端的电压降计算得到）；
4. 分别将拨码 SW902 的状态置为“001”，“010”，“100”，用示波器在 T9 处观察波形，分析反馈大小对振荡幅度的影响；
5. 将拨码 SW901 分别置为“10”“01”，当改变 W92 时，在 T9 处用频率计观察频率变化情况，并比较 LC、晶体两种振荡器的工作情况。

2.3.5 实验扩展

1. 整理实验所测得的数据，并用所学理论加以分析；
2. 分析为什么静态电流 I_{EO} 增大，输出振幅增加，而 I_{EO} 过大反而会使振荡器输出幅度下降？
3. 比较 LC 振荡器与晶体振荡器的优缺点。

2.4 晶体振荡电路实验

2.4.1 实验分析

1. 了解晶体振荡器的工作原理及特点;
2. 掌握晶体振荡器的设计方法及参数的计算方法;
3. 比较 LC 振荡器和晶体振荡器频率稳定度, 加深对晶体振荡器频率稳定性高的理解。

2.4.2 实验原理

晶体管共基组态电容三点式振荡器的基本电路如图 2.4.1 所示。在图 2.4.1 中, 发射极连接的两个电抗元件为同性质的容抗元件 C1 和 C2, 与基极连接为两个异性质的电抗元件 C2 和 L。该电路满足相位条件, 反馈系数 F 一般取 0.125 ~ 0.5 之间。根据振幅起振条件, 只要 A_0 大于一定的值, 电路就可以处于振荡状态。

$$A_0 \times F > 1$$

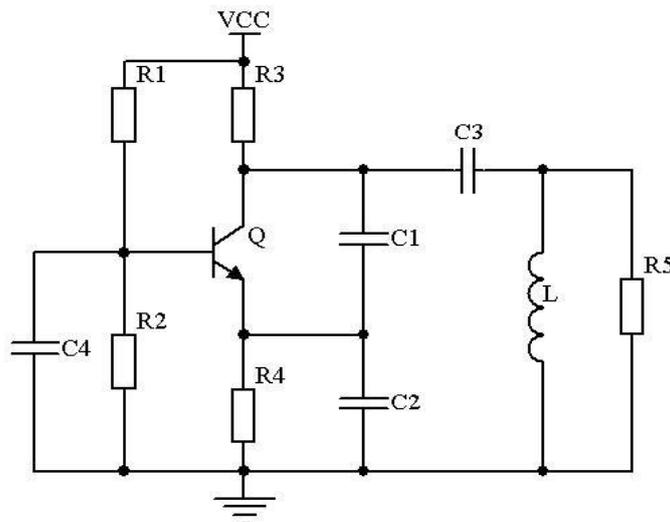


图 2.4.1 共基组态振荡器

晶体振荡电路是为了改善振荡频率稳定度, 减小振荡频率受温度、负载、电源等外界因素影响的程度而将振荡回路采用石英晶体作为振荡回路元件。石英晶体具有十分稳定的物理和化学特性, 在谐振频率附近, 晶体的等效参量 L_q 很大, C_q 很小, r_q 也不大, 因此晶体 Q 值可达百万数量级, 所以晶体振荡器的频率稳定度比 LC 振荡器高很多。为了矫正晶体振荡器的输出频率, 电路中并联一可调电容进行微调。

本实验使用的电路模块的原理图如图 2.4.2 所示:

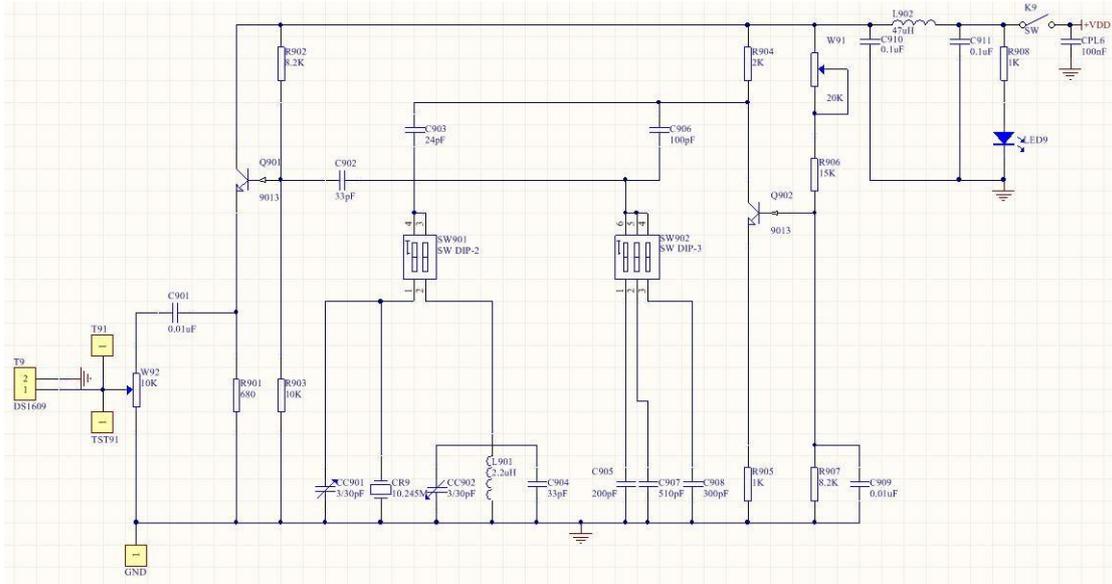


图 2.4.2 LC 晶体振荡器原理图

2.4.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）；



2.4.4 实验步骤

1. 实验模块：LC 晶体振荡器。
2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关，打开 LC 晶体振荡器电源开关 K9。将拨码 SW901 置为“10”，使振荡频率为 10.245MHz；
3. 将拨码 SW902 的状态置为“001”，“010”，“100”，用示波器在 T9 处观察波形，分析反馈大小对振荡幅度的影响；
4. 将拨码 SW901 分别置为“10”、“01”，当改变 W92 时，在 T9 处用频率计观

察频率变化情况，并比较 LC、晶体两种振荡器的工作情况。

2.4.5 实验扩展

1. 整理实验所测得的数据，并用所学理论加以分析。
2. 比较 LC 振荡器与晶体振荡器的优缺点。
3. 分析为什么静态电流 I_{eo} 增大，输出振幅增加，而 I_{eo} 过大反而会使振荡器输出幅度下降？



2.5 单调谐回路振荡放大器实验

2.5.1 实验分析

1. 熟悉单调谐回路谐振放大器的组成及电路中各元件的作用；
2. 通过对谐振回路的调试，对放大器处于谐振时的技术指标进行测试，包括电压放大倍数，通频带，矩形系数；
3. 进一步掌握高频小信号调谐放大器的工作原理，学会小信号调谐放大器的设计方法。

2.5.2 实验原理

1. 硬件分析

实验电路如图 2.5.1 所示。电路采用共发射极接法，晶体管的集电极负载为 LC 并联谐振回路，该电路同时完成高频信号放大和选频作用。电路中，晶体管的静态工作点由电阻 R_{B1} 、 R_{B2} 及 R_E 决定，其计算方法与低频单管放大器相同。

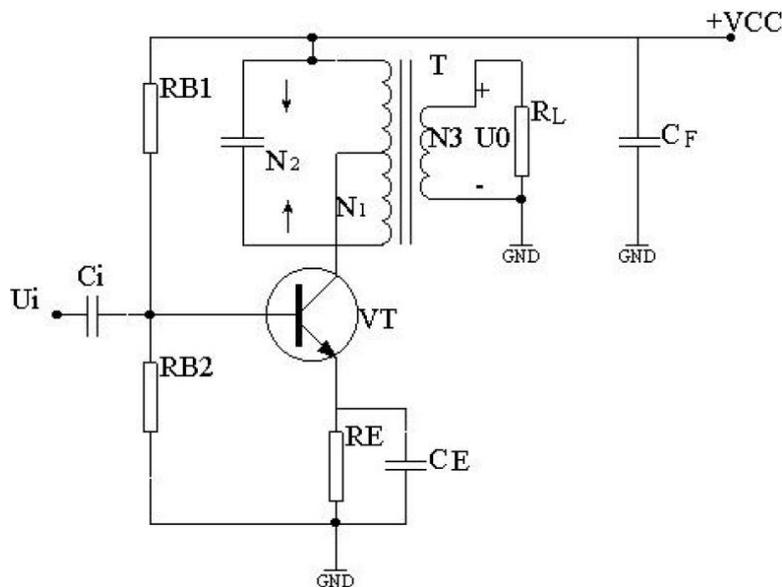


图 2.5.1 单调谐回路谐振放大器

本实验使用的模块电路原理图如图 2.5.2 所示：

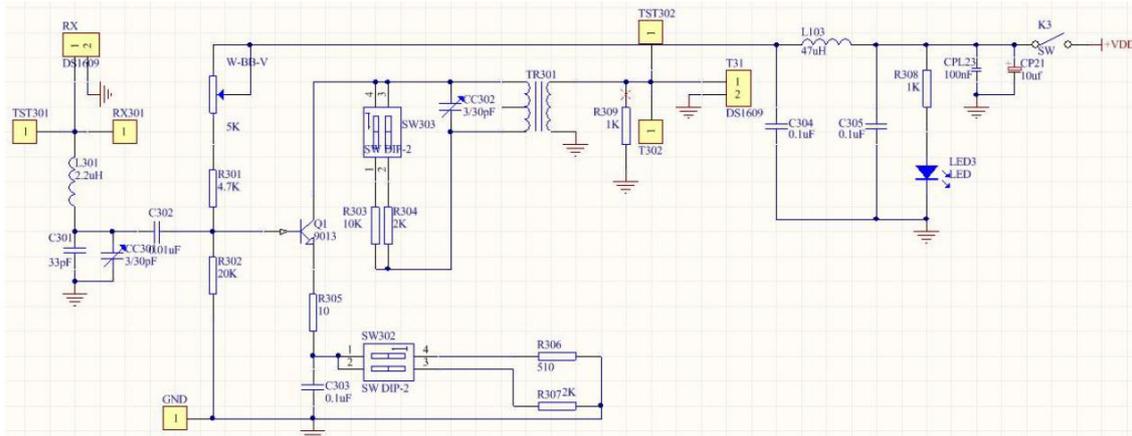


图 2.5.2 小信号调谐放大原理图

2. 调谐放大器的性能指标及测量方法

高频小信号调谐放大器的主要性能指标有谐振频率 f_0 ，谐振电压放大倍数 A_{v0} ，放大器的通频带 B_W 和选择性。

(1) 谐振频率 f_0 的测量方法

放大器的调谐回路谐振时所对应的频率 f_0 称为放大器的谐振频率，其值为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中，L 为调谐回路电感线圈的电感量；C 为调谐回路的总电容，即：

$$C = C_1 + P_1^2 C_{oe} + P_2^2 C_{ie}$$

式中， C_{oe} 为晶体管的输出电容； C_{ie} 为晶体管的输入电容。

谐振回路的谐振频率可用扫频仪来测量，方法是调变压器 T 的磁芯，使电压谐振曲线的峰值出现在规定的谐振频率点 f_0 。

(2) 电压放大倍数 A_{v0} 的测量方法

放大器的谐振回路谐振时，所对应的电压放大倍数 A_{v0} 称为调谐放大器的电压放大倍数。 A_{v0} 的测量方法是：在谐振回路已处于谐振状态时，用高频电压表测量电路输出电压 u_0 和输入电压 u_i 的大小，然后通过下面的公式计算得到 A_{v0} 。

$$A_{v0} = \frac{u_0}{u_i} \quad (\text{或 } A_{v0} = 20 \lg \left(\frac{u_0}{u_i} \right) \text{ dB})$$

(3) 通频带 B_W 的测量方法

当工作频率偏离谐振频率时，放大器的电压放大倍数下降，习惯上称电压放大倍数 A_v 下降到谐振电压放大倍数 A_{v0} 的 0.707 倍时所对应的频率偏移称为放大器的通频带 B_W ，其表达式为：

$$B_W = 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L}$$

其中, Q_L 为谐振回路的有载品质因数。

通频带 B_W 的测量方法: 可通过测量放大器的谐振曲线来求通频带, 一般采用逐点法来测量, 即先调谐放大器的谐振回路使其谐振, 记下此时的谐振频率 f_0 及电压放大倍数 A_{v0} , 然后改变高频信号发生器的频率(保持输出电压幅度不变), 并测出对应的电压放大倍数 A_v 。由于回路失谐后电压放大倍数下降, 所以放大器的谐振曲线如图 2.5.3 所示:

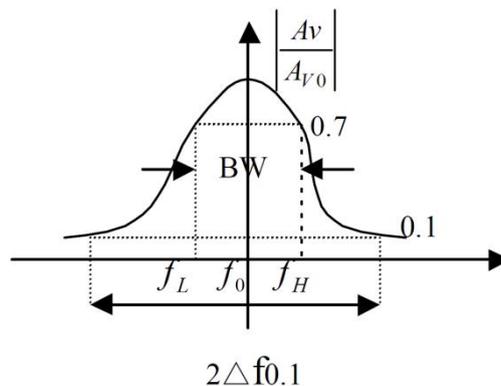


图 2.5.3 谐振曲线

图中, $B_W = f_H - f_L = 2\Delta f_{0.7}$ 。通频带越宽放大器的电压放大倍数越小。要想得到一定宽度的通频宽, 同时又能提高放大器的电压增益, 可以通过选用 Y_{fe} 较大的晶体管或尽量减小调谐回路的总电容量 C 实现。

(4) 选择性(矩形系数)的测量

调谐放大器的选择性可用谐振曲线的矩形系数 $K_{V0.1}$ 来表示。矩形系数 $K_{V0.1}$ 为电压放大倍数下降到 $0.1K_{V0.1}$ 时对应的频率偏移与电压放大倍数下降到 $0.707K_{V0.1}$ 时对应的频率偏移之比, 即:

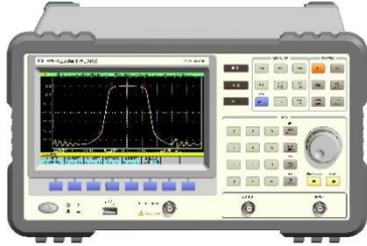
$$K_{V0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{2f_{0.1}}{B_W}$$

上式表明, 矩形系数 $K_{V0.1}$ 来越小, 谐振曲线的形状越接近矩形, 选择性越好, 反之亦然。

2.5.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展, 需提前做好: 高频电路实验系统、示波器、扫频仪(选项)和一套调试工具(除高频电路实验系统设备以外, 其它工具可结合实际情况配合实

验使用)；

<p style="text-align: center;">高频电路实验系统</p> 	<p style="text-align: center;">扫频仪</p> 
<p style="text-align: center;">示波器</p> 	<p style="text-align: center;">调试工具</p> 

2.5.4 实验步骤

1. 实验模块：小信号调谐放大、高频信号源
2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关，按下 K3 和 K8，此时相应 LED 点亮。

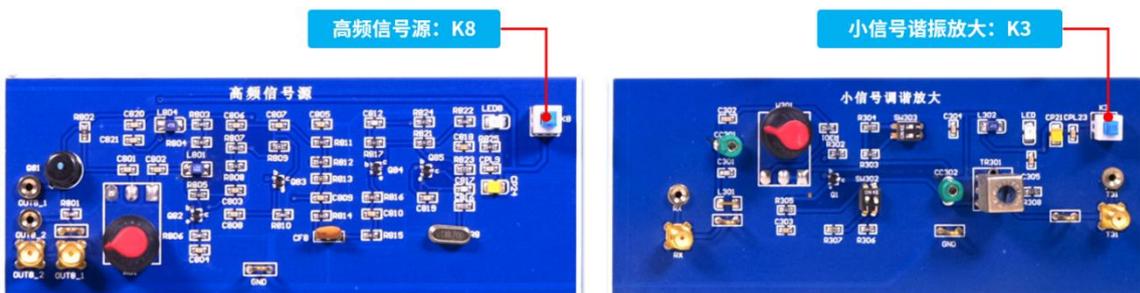


图 2.5.4 模块通电

3. 用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和小信号调谐放大单元的 RX，调节高频信号源模块中的电位器 W81，让 OUT8_1 输出频率为 10.7MHz，幅度为 0.1V 的正弦波。在小信号调谐放大模块中，用示波器探头在 T31 处测试，调节变压器 TR301 的磁芯使 T31 输出波形最大。注意：若输出波形失真，此时适当调节 W301 即可。



图 2.5.5 输出波形测量

4. 用示波器测输入信号的峰峰值，记为 U_i 。测输出信号的峰峰值记为 U_0 。则小信号放大的电压放大倍数 $A_{v0} = \frac{u_0}{u_i}$

5. 测量通频带 B_W （如无扫频仪，此步骤可省略）

先调节“频率偏移”（扫频宽度）旋钮，使相邻两个频标在横轴上占有适当的格数，然后接入被测放大器，调节“输出衰减”和y轴增益，使谐振特性曲线在纵轴占有一定高度，测出其曲线下降3dB处两对称点在横轴上占有的宽度，根据内频标就可以近似算出放大器的通频带

6. 测量放大器的选择性

放大器选择性的优劣可用放大器谐振曲线的矩形系数 $K_{r0.1}$ 表示。用4种同样的方法测出 $B_{0.1}$ 即可：

$$K_{r0.1} = \frac{B_{0.1}}{B_{0.7}} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}}$$

2.5.5 实验扩展

1. 整理好实验数据，画出幅特性曲线，分析原因；
2. 分析三极管集电极电流对放大器的动态范围的影响；
3. 如果实验中出现自激现象，应该怎样消除？

2.6 高频谐振功率放大电路实验

2.6.1 实验分析

1. 了解谐振功率放大器的工作原理，掌握高频功率放大器的设计方法；
2. 理解谐振功率放大器的负载阻抗，激励电压和集电极电源电压变化对其工作状态的影响；
3. 了解电源电压与集电极负载对功率放大器功率和效率的影响。

2.6.2 实验原理

谐振功率放大器采用选频网络作为负载回路。根据放大器电流导通角 θ 的范围功率放大器可分为甲类、乙类、丙类及丁类等不同类型。电流导通角 θ 愈小，放大器的效率 η 愈高。其中，甲类功放的 $\theta=180^\circ$ ，效率 η 最高为50%，而丙类功放的 $\theta<90^\circ$ ，效率 η 最高为80%。甲类功率放大器一般作为中间级或输出功率较小的末级功率放大器使用。丙类功率放大器通常作为末级功放以获得较大的输出功率和较高的效率。图2.6.1是由两级功率放大器组成的高频功率放大器电路。

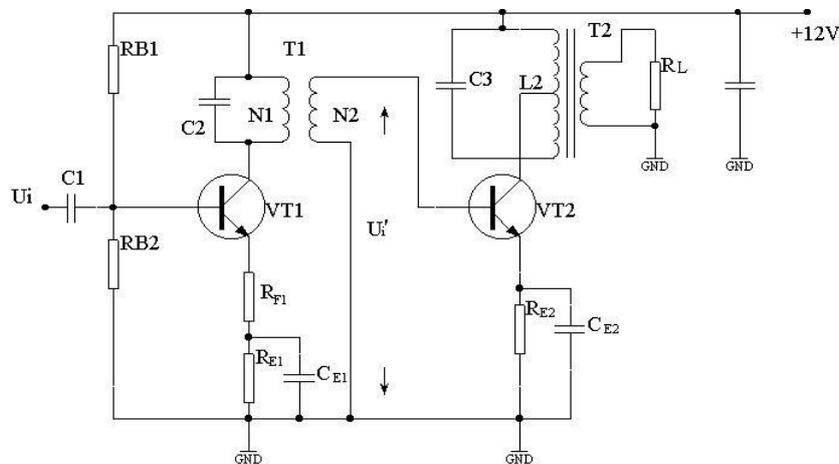


图 2.6.1 高频功率放大器

图中，晶体管 VT1 组成甲类功率放大器，工作在线性放大状态。RB1、RB2 为基极偏置电阻，RE1 为直流负反馈电阻，以稳定电路的静态工作点，RF1 为交流负反馈电阻（可以提高放大器的输入阻抗，稳定增益）；晶体管 VT2 组成丙类谐振功率放大器，导通角为 70° ，基极偏压采用发射极电流的直流分量 I_{E0} 在发射极偏置电阻 R_e 上产生所需要的 V_{BB} ，其中直流反馈电阻为 $30\ \Omega$ ，交直流反馈电阻为 $10\ \Omega$ ，集电极谐振回路电容为 82pF ，负载为 $50\ \Omega$ ，输出由变压器耦合输出，采用中间抽头，以利于阻抗匹配。

本实验使用的模块电路原理图如图 2.6.2 所示:

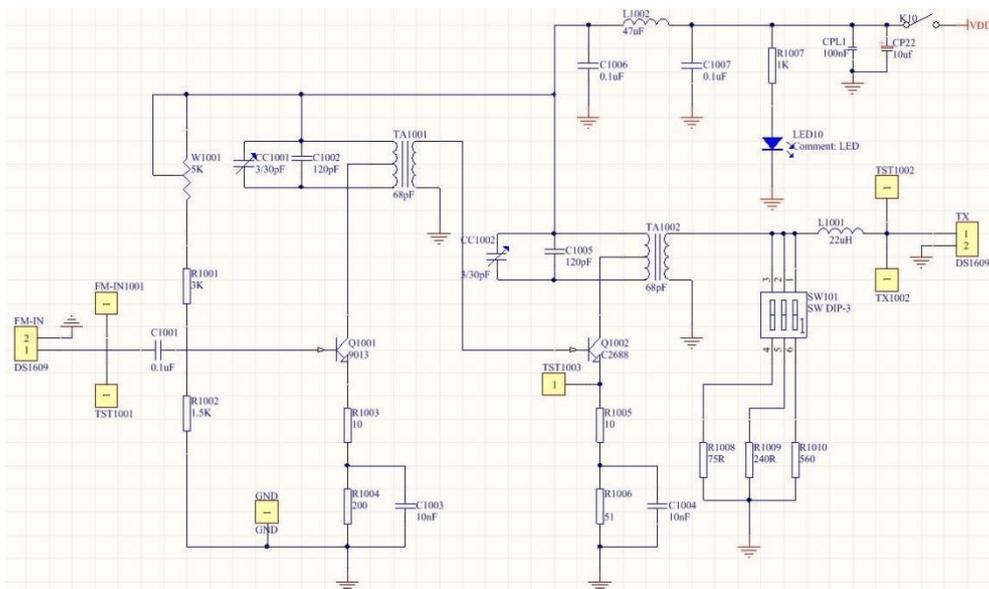


图 2.6.2 高频功率放大电路原理图

2.6.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展,需提前准备好:高频电路实验系统、示波器和一套调试工具(除高频电路实验系统设备以外,其它工具可结合实际情况配合实验使用);



2.6.4 实验步骤

1. 实验模块: 高频信号源、高频功率放大电路。
2. 接通 220V 电源, 打开实验箱开关, 按下开关 K10 和 K8, 相应 LED 点亮。
3. 由高频信号源模块产生 10.7MHz 的载波信号, 从 OUT8_1 输出, 用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和高频功率放大电路模块的 FM_IN。在高频功率放大电路中, 将拨码 SW101 状态置为“100”, 并在 TX 处观察输出波形, 调节 TA1001、TA1002 和

W1001, 使输出波形不失真且最大。

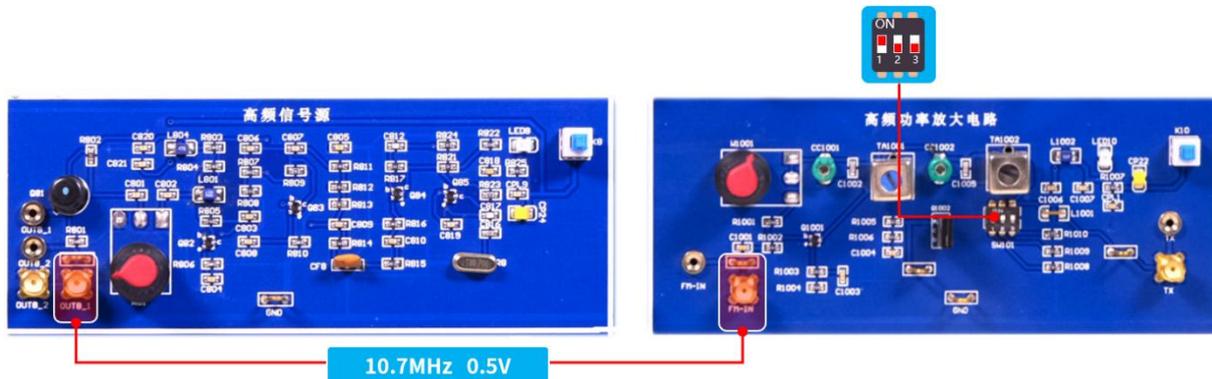


图 2.6.3 高频信号放大连接示意图

4. 从 0 开始逐渐增加信号幅度, 在 Q1002 的 e 极上观察电流波形, 直至出现失真为止。

5. 保持 FM_IN 输入信号在 10.7MHz, 并保持输入信号幅度不变, 改变负载 RL (让 SW101 分别拨成 “001”, “010”, “100”, “011”, “110”, “111” 可改变负载), 观察 Q1002 的 c 极和 TX 点在不同负载时的信号波形。

6. 用高频毫伏表测量负载电阻上的电压, 改变负载电阻 RL, 记下相应的电流 I_{CO} 和电压 V_L, 并且计算当 RL=51Ω 时的功率和效率;

7. 使 RL=51Ω (SW101 拨成 “111”), 用示波器观察 Q1002 发射极 e 上的电流波形。改变输入信号大小, 观察放大器三种状态的电流波形。

2.6.5 实验扩展

1. 观察放大器的三种工作状态, 画出放大器在三种不同负载时的电流波形;

2. 了解电路的负载特性, 计算当 RL=51Ω 和 560Ω 时, 放大器的输出功率和效率。绘出负载特性曲线。

3. 观察放大器工作状态与激励信号幅度的关系。

2.7 平衡调幅电路实验

2.7.1 实验分析

1. 了解模拟乘法器 MC1496 的工作原理;
2. 掌握利用乘法器实现平衡调幅电路的原理及方法。

2.7.2 实验原理

1. 基本工作原理

集成模拟乘法器 MC1496 的内部结构和封装见实验十部分。MC1496 是完成两个模拟量相乘的电子器件。在高频电子线路中, 振幅调制、同步检波、混频、倍频、鉴频、鉴相等调制与解调的过程, 均可视为两个信号相乘或包含相乘的过程。采用集成模拟乘法器实现上述功能比采用分离器件如二极管和三极管要简单得多, 而且性能优越。所以目前在无线通信、广播电视等方面应用较多。

设输入信号 $U_x = U_{xm} \cos \omega_x t$, $U_y = U_{ym} \cos \omega_y t$, 则 MC1496 乘法器的输出 U_0 与反馈电阻 R_E 及输入信号 U_x 、 U_y 的幅值有关。

- 1) 不接负反馈电阻(脚 2 和 3 短接)

当 U_x 和 U_y 皆为小信号时, 由于三对差分放大器(VT1, VT2, VT3, VT4 及 VT5, VT6) 均工作在线性放大状态, 则输出电压 U_0 可近似表示为

$$\begin{aligned}
 U_0 &\approx \frac{I_0 R_L}{2U_T^2} U_x U_y = K_0 U_x U_y \\
 &= \frac{1}{2} K_0 U_{xm} U_{ym} [\cos(\omega_x + \omega_y)t + \cos(\omega_x - \omega_y)t]
 \end{aligned}$$

式中, K 为乘法器的乘积系数, 与器件外接元件参数有关, 即 $K_0 = \frac{I_0 R_L}{2U_T^2}$; U_T 为温度的电压当量, 当 $T=300K$ 时, $U_T = \frac{KT}{q} = 26mV$; R_L 是输出负载电阻。

上式表明, 当输入均为小信号时, MC1496 可近似为一理想乘法器, 输出信号 U_0 中仅包含两个输入信号的和频与差频分量。当 U_y 为小信号, U_x 为大信号时, 由于双差分放大器(VT1、VT2 和 VT3、VT4) 处于开关工作状态, 其电流波形将是对称的方波, 乘法器的输出电压 U_0 可近似表示为:

$$U_0 \approx K_0 U_x U_y$$

$$= K_0 U_{gm} \sum_{n=1}^{\infty} A_n [\cos(n\omega_x + \omega_y)t + \cos(n\omega_x - \omega_y)t] \quad (n \text{ 为奇数})$$

输出信号 U_0 中, 包含 $\omega_x \pm \omega_y, 3\omega_x \pm \omega_y, 5\omega_x \pm \omega_y, \dots, (2n-1)\omega_x \pm \omega_y$ 等频率分量。

2) 接入负反馈电阻

由于 R_E 的接入, 扩展了 U_y 的线性动态范围, 所以器件的工作状态主要由 U_x 决定, 分析表明:

当 U_x 为小信号 ($< 26mV$) 时, 输出电压 U_0 可表示为

$$U_0 = \frac{R_L}{R_E U_T} U_x U_y = \frac{1}{2} K_E U_{xm} U_{ym} [\cos(\omega_x + \omega_y)t + \cos(\omega_x - \omega_y)t]$$

式中: $K_E = \frac{R_L}{R_E U_T}$

当接入负反馈电阻 R_E 后, U_x 为小信号时, MC1496 近似为一理想的乘法器, 输出信号 U_0 中只包含两个输入信号的和频与差频。

当 U_x 为大信号 ($> 100mV$) 时, 输出电压 U_0 可近似表示为:

$$U_0 \approx \frac{2R_L}{R_E} U_y$$

上式表明, U_x 为大信号时, 输出电压 U_0 与输入信号 U_x 无关。

2. 振幅调制原理

振幅调制是使载波信号的峰值正比于调制信号的瞬时值的变换过程。通常载波信号为高频信号, 调制信号为低频信号。设载波信号的表达式为 $U_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$, 调制信号的表达式为 $U_c(t) = U_{cm} \cos \Omega t$, 则调幅信号的表达式为:

$$U_0(t) = U_{cm} (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

$$= U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t$$

式中 $m = \frac{U_{\Omega m}}{U_{cm}}$ 为调幅系数; $U_{cm} \cos \omega_c t$ 为载波信号; $\frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t$ 为上边带信号; $\frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t$ 为下边带信号。

它们的波形及频谱如图 2.7.1 所示。

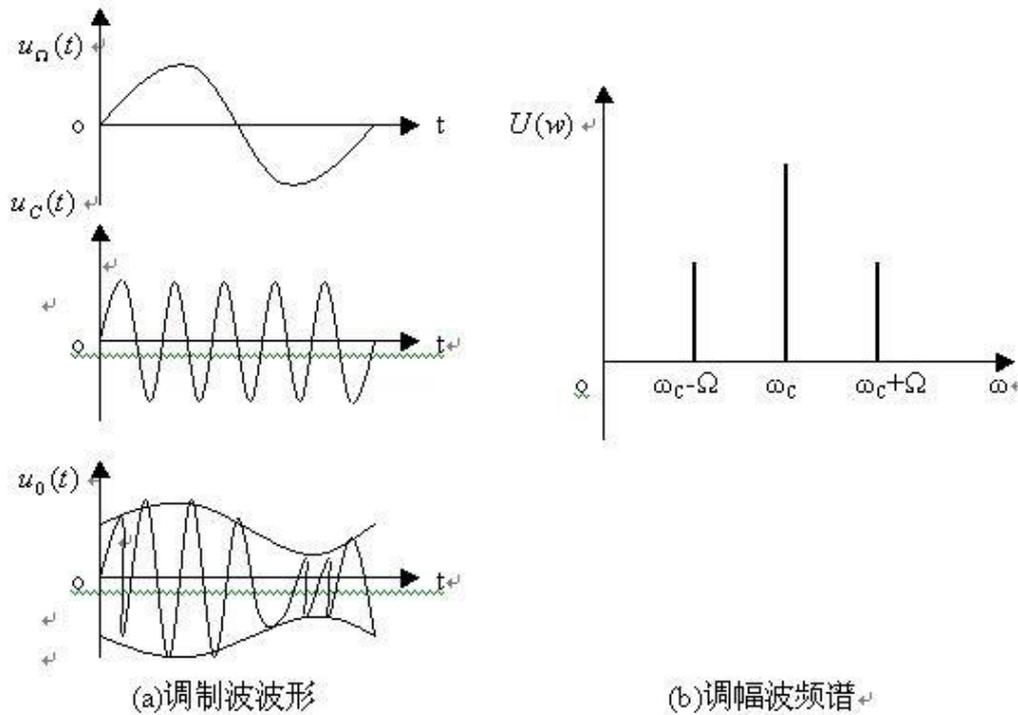


图 2.7.1 调制波形及频谱

由图 2.7.1 可见，调幅波中载波分量占有很大比重，因此信息传输效率较低，称这种调制为有载波调制。为提高信息传输效率，广泛采用抑制载波的双边带或单边带振幅调制。

双边带调幅波的表达式为：

$$U_0(t) = \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t$$

$$= m U_{cm} \cos \omega_c t \cos \Omega t$$

单边带调幅波的表达式为：

$$U_0(t) = \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t \quad (\text{上边带})$$

或：

$$U_0(t) = \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t \quad (\text{下边带})$$

MC1496 构成的振幅调制器电路如图 2.7.2 所示。

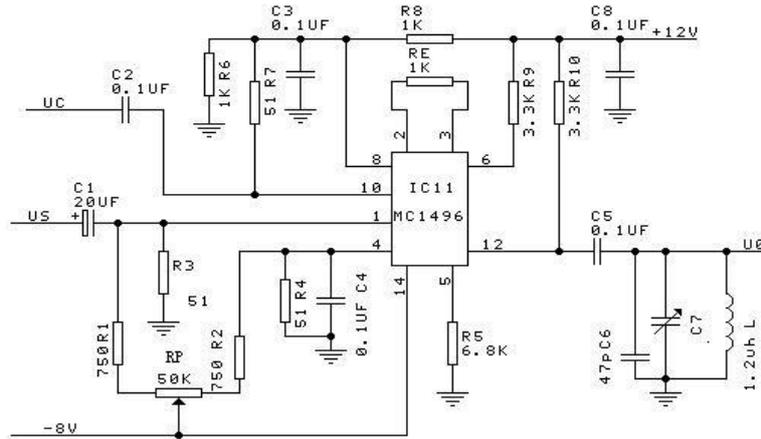


图 2.7.2 MC1496 构成的调幅器 (参考图)

在图 2.7.2 中, 载波信号 U_c 经耦合电容 C_2 从 U_x 端输入, C_3 为高频旁路电容, 使 8 脚接地。调制信号 U_s 经低频耦合电容 C_1 从 U_y 端输入, C_4 为低频旁路电容, 使 4 脚接地。调幅信号 U_0 从 12 脚单端输出。器件采用双电源供电方式, 所以 5 脚的偏置电阻 R_5 接地, 可计算器件的静态偏置电流 I_5 , 即

$$I_5 = I_0 = \frac{|-U_{EE}| - 0.7V}{R_5 + 500\Omega} = 1mA$$

脚 2 与 3 脚之间接入负反馈电阻 R_E , 以扩展调制信号的 U_s 的线性动态范围, R_E 增大, 线性范围增大, 但乘法器的增益随之减少。

电阻 R_6 、 R_7 、 R_8 及 R_L 为器件提供静态偏置电压, 保证器件内部的各个晶体管工作在放大状态。对于图 2.7.2 所示电路参数, MC1496D 的静态 ($U_c=0$, $U_\Omega=0$) 工作电压为表 2.7.1 所示。

表 2.7.1 MC1496 静态工作电压

u1	u2	u3	u4	u5	u6	u8	u10	u12
0V	-0.7V	-0.7V	0V	-6.8V	8.6V	6V	6V	8.6V

R_1 、 R_2 与电位器 RP 组成平衡调节电路, 改变 RP 可以使乘法器实现抑制载波的振幅调制或有载波的振幅调制, 操作过程如下:

(1) 抑制载波振幅调制

U_x 端输入载波信号 $U_c(t)$, 其频率 $f_c=10.7MHz$, $U_{CP-P}=50mV$ 。 U_y 端输入调制信号 $U_s(t)$, 其频率 $f_\Omega=1kHz$, $U_{\Omega P-P}=0$ 。调节 RP , 使输出 $U_0=0$ (此时 $U_1 = U_4$)。

逐渐增加 $U_{\Omega P-P}$, 则输出信号 $U_0(t)$ 的幅度逐渐增大, 最后出现如图 2.7.3 (a) 所示

的抑制载波的调幅信号。由于器件内部参数不可能完全对称，致使输出出现泄漏信号。
脚 1 和 4 分别接电阻 R3 和 R4 可以较好地抑制载波泄漏信号和改善温度性能。

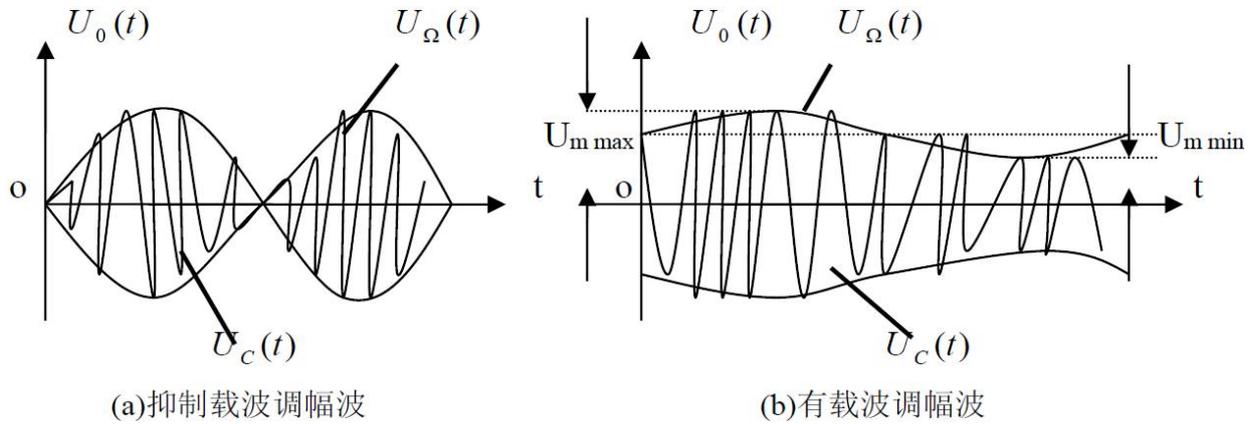


图 2.7.3 乘法器输出的调幅波

(2) 有载波振幅调制

U_x 端输入载波信号 $U_c(t)$ ， $f_c=10.7\text{MHz}$ ， $U_{CP-P}=50\text{mV}$ ，调节平衡电位器 RP，使输出信号 $U_0(t)$ 中有载波输出（此时 U_1 与 U_4 不相等）再从 U_y 端输入调制信号，其 $f_\Omega=1\text{KHz}$ ，当 U_{CP-P} 由零逐渐增大时，则输出信号 $U_0(t)$ 的幅度发生变化，最后出现如图 2.7.3 (b) 所示的有载波调幅信号的波形，调幅系数 m 为：

$$m = \frac{U_{m\max} - U_{m\min}}{U_{m\max} + U_{m\min}} \times 100\%$$

式中， $U_{m\max}$ —调幅波幅度的最大值； $U_{m\min}$ —调幅波幅度的最小值。本实验使用的

电路模块的原理图如图 2.7.4 所示，

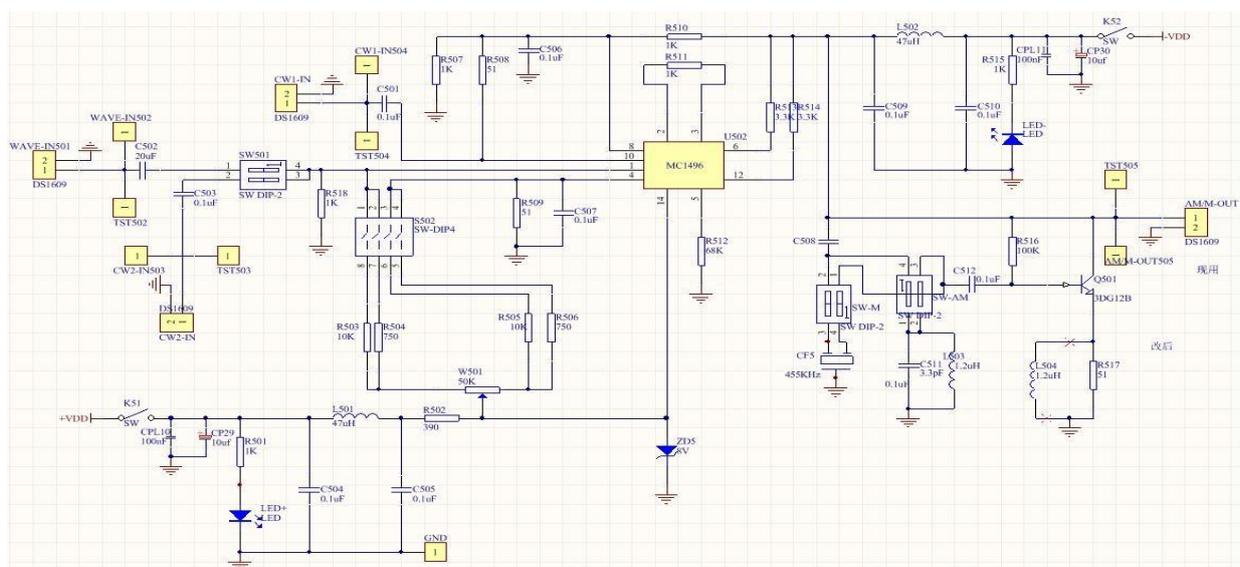


图 2.7.4 集成混频、平衡调幅电路原理图

2.7.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2.7.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、高频信号源、集成混频平衡调幅电路。
2. 接通220V 电源，打开实验箱开关即各个模块开关，相应 LED 点亮。
3. 将集成混频、平衡调幅电路模块的拨码置为如下状态：SW501：“10”，SW502：“0101”， SW503：“00”，SW504：“11”，MC1496 构成平衡调幅电路。

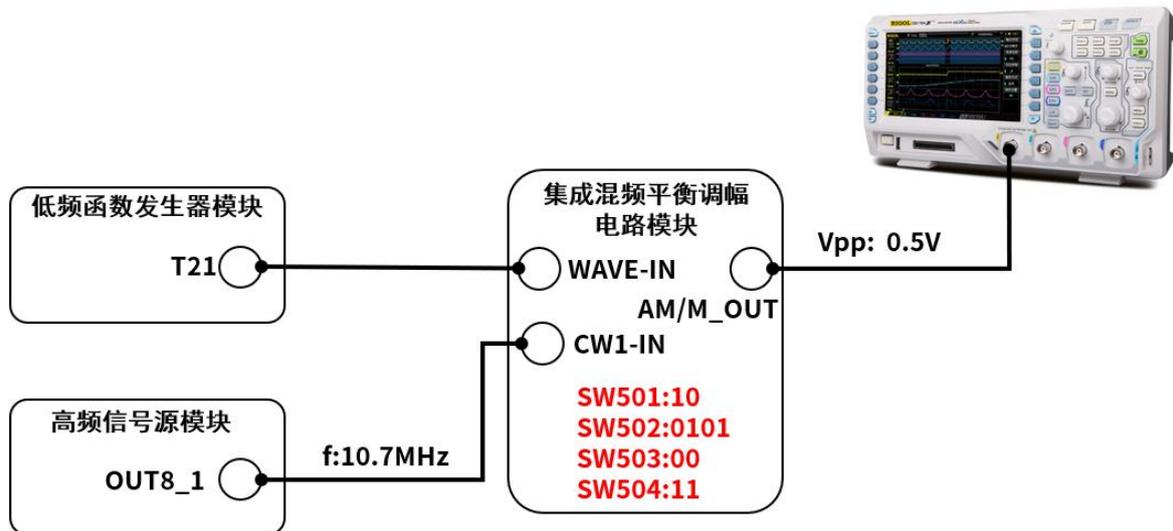


图 2.7.5 平衡调幅电路实验接线

4. 用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和集成混频、平衡调幅电路模块的 CW1-IN，从 CW1-IN 处输入由高频信号源提供的 10.7MHz 的载波信号；用导线连接低频函数发生器模块的 T21 和集成混频、平衡调幅电路模块的 WAVE-IN，从 WAVE-IN 处

输入由低频函数发生器模块提供的调制信号，用示波器在 AM/M-OUT 处观察输出的调幅波形（幅度可达 0.5V）。

5. 当 $U_c(t)=0$ 、 $U_s(t)=0$ 时，测试 MC1496 各管脚电压，看是否与表 2.7.1 中的值相符。

6. CW1-IN 输入信号保持不变，从 WAVE-IN 处输入幅度为 0 的 1kHz 调制信号。调节集成混频、平衡调幅电路模块的可调电阻 W501，使在 AM/M-OUT 处测试的信号 $U_0(t)=0$ 。逐渐增大调制信号的幅度，直至出现抑制载波的调幅信号出现。

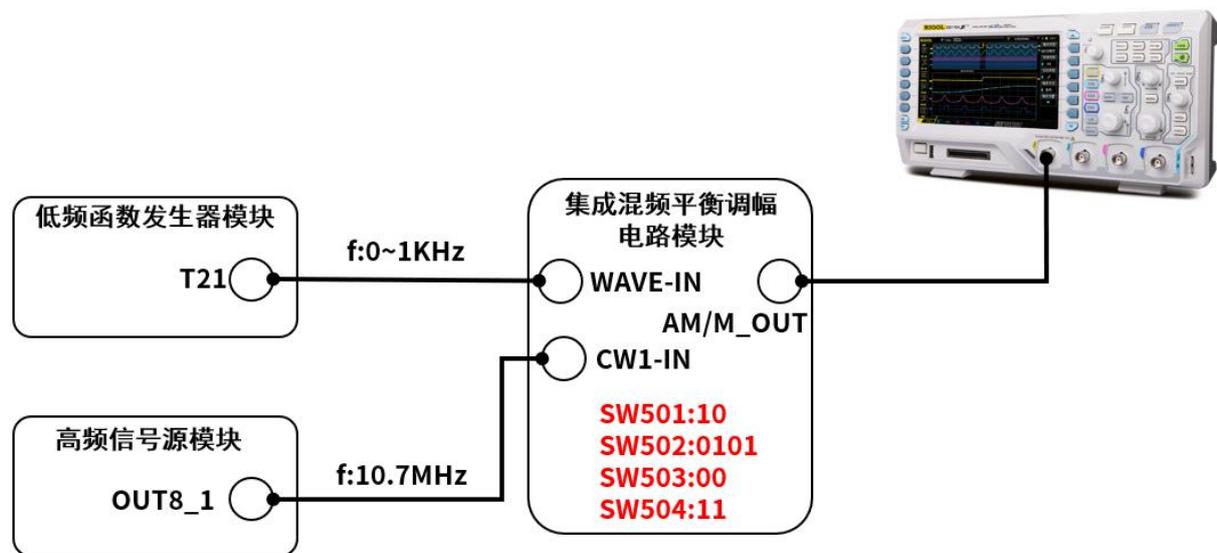


图 2.7.6 平衡调幅电路实验接线（调整输入低频信号）

7. 在步骤6的基础上调节 W501，使输出信号中有载波存在，则输出有载波的振幅调制信号。

2.7.5 实验扩展

1. 整理各项实验所得的数据，绘制出有关曲线和波形。
2. 对实验结果进行分析。
3. 分析为什么在平衡调幅实验中得不到载波绝对为零的波形？

2.8 集电极调幅电路实验

2.8.1 实验分析

1. 掌握集电极调幅工作原理；
2. 掌握静态调制特性与动态调幅特性的测试方法；
3. 掌利用示波器测量调幅系数 M_a 的方法。

2.8.2 实验原理

集电极调幅是利用低频调制电压去控制晶体管的集电极电压，通过集电极电压的变化，使集电极高频电流的基波分量随调制电压的规律变化，从而实现调幅。集电极调幅电路的基本结构如图 2.8.1 所示：

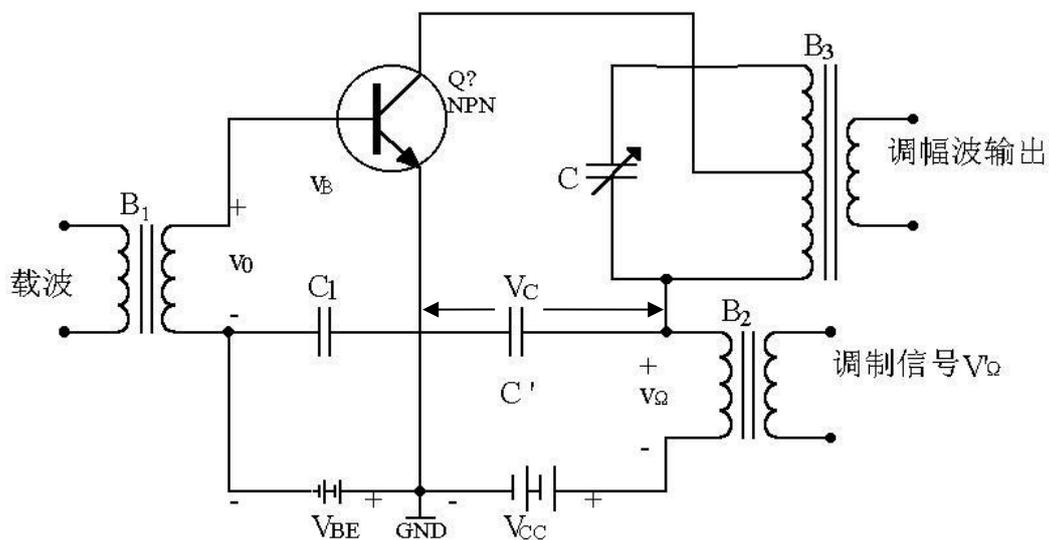


图 2.8.1 集电极调幅原理电路

实验电路中，为了增加信号的强度，增加了一级推动 Q601，工作于甲类。Q602 为调幅晶体管，工作于丙类。被调信号由高频信号源从 CW-IN 输入，调制信号从 WAVE-IN 处输入。

本实验使用的模块电路的原理图如图 2.8.2 所示，

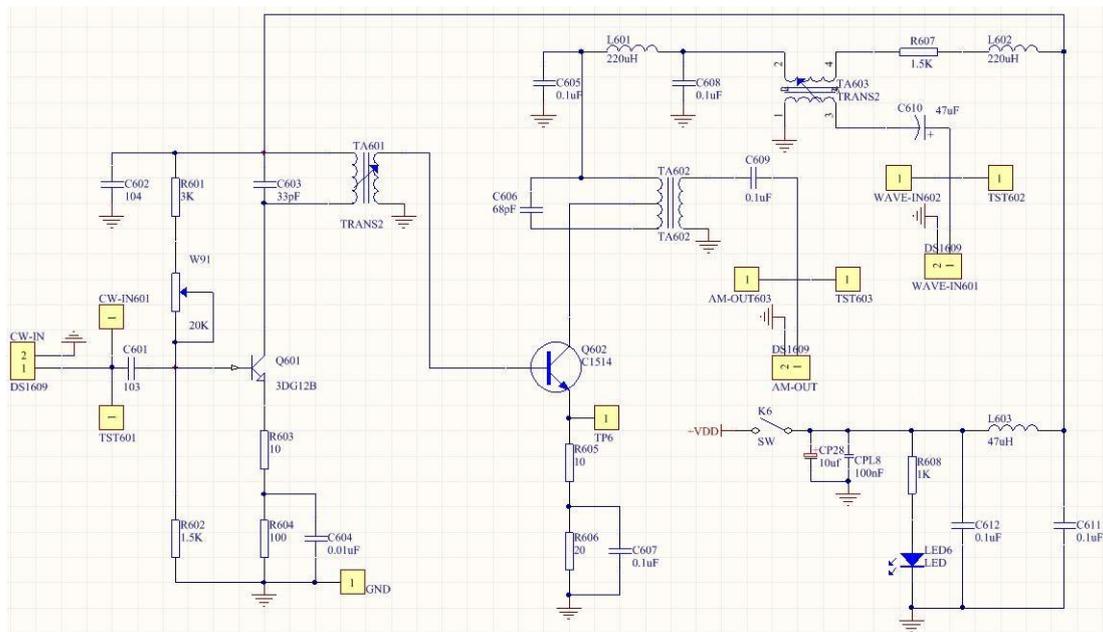


图 2.8.2 集电极调幅电路原理图

2.8.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2.8.4 实验步骤

1. 实验模块：高频信号源、低频函数发生器、集电极调幅电路。
2. 接通220V 电源，打开实验箱开关，按下相应模块开关，相应 LED 点亮。
3. 用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和集电极调幅电路模块的 CW-IN，CW-IN 处输入由高频信号源提供的 10.7MHz 的载波信号，在 AM-OUT 处用示波器观察输出波形，调节 TA601、TA602 的磁芯使 AM-OUT 处输出信号最大且不失真；

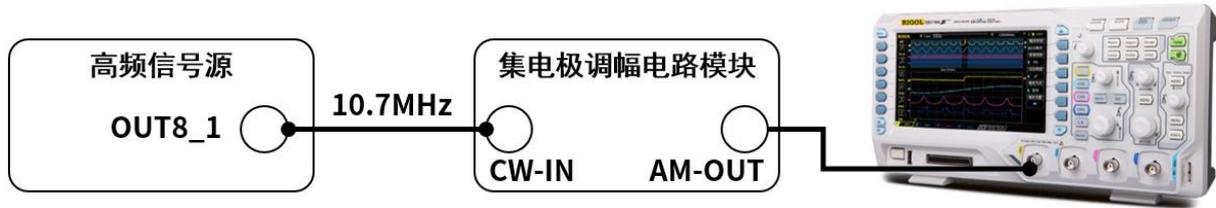


图 2.8.3 高频信号调制

4. 改变从 CW-IN 处输入信号的大小 (从小到大), 在 AM-OUT 观察输出电流波形直到观察到电流波形顶点出现失真为止。

5. 用导线连接低频函数发生器模块的 T21 和集电极调幅电路模块的 WAVE-IN, WAVE-IN 处输入由低频函数发生器模块提供的 1KHz 左右的调制信号, 调制信号的幅度由 0V 开始增加。此时用示波器在集电极调幅电路模块的 AM-OUT 处可以看到调幅信号。



图 2.8.4 低频信号调制

改变调幅信号大小, 计算出不同的调制信号幅度时的调幅系数 M_a 。其中 M_a 可由下式计算:

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

式中, A 为调幅信号的最大峰峰值, B 为调幅信号的最小峰峰值。

6. 根据调制信号幅度和计算出的调幅系数, 完成表 2.8.1。

表 2.8.1 调制电压与调幅系数关系表

U_s (V)	0.2	0.5	0.8	1	2	3	4
M_a								

2.8.5 实验扩展

1. 整理实验所得数据。
2. 画出不失真和各种失真的调幅波波形。
3. 结合电路, 分析电路为什么不能出现过调制现象?

2.9 二极管开关混频器电路实验

2.9.1 实验分析

1. 掌握变频及二极管开关混频原理；
2. 掌握环形开关混频器组合频率的测试方法；
3. 了解环形开关混频器的优点。

2.9.2 实验原理

变频器的原理方框图如图 2.9.1 所示：

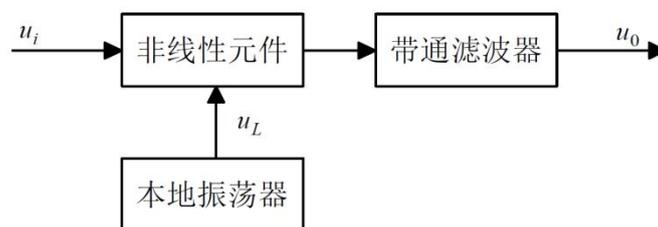


图 2.9.1 变频原理框图

所谓变频原理就是当输入信号 u_i 和本地振荡信号 u_L 同时作用到非线性元件上时，就会在它的输出信号中产生许多组合频率分量，然后，用适当的滤波器取出所需的频率分量 f_0 。

混频器有多种形式，如二极管混频器、晶体管混频器、场效应混频器和差分对管混频器等。这些混频器各有优缺点，其中，由二极管组成的平衡混频器和环形混频器与晶体管混频器相比，具有动态范围大、噪声小、本地振荡无辐射、组合频率少等优点，因而被广泛采用。

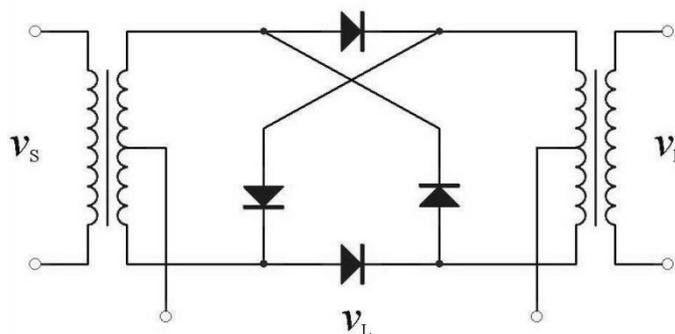


图 2.9.2 集成环形开关混频器内部电原理图

图 2.9.2 为集成环形开关混频器内部电原理图。其工作原理如下：混频器的本振输入信号为 10.7MHz（由高频信号源提供），而射频输入信号是 10.245MHz（由 LC、晶

体振荡器单元提供), 则输出的一次差频为 455kHz, 经过陶瓷滤波器进行滤波, 最后输出中频 455kHz 的信号。因信号较弱, 所以在实验箱电路中增加 Q7 进行放大。

本实验使用的模块电路原理图如图 2.9.3 所示:

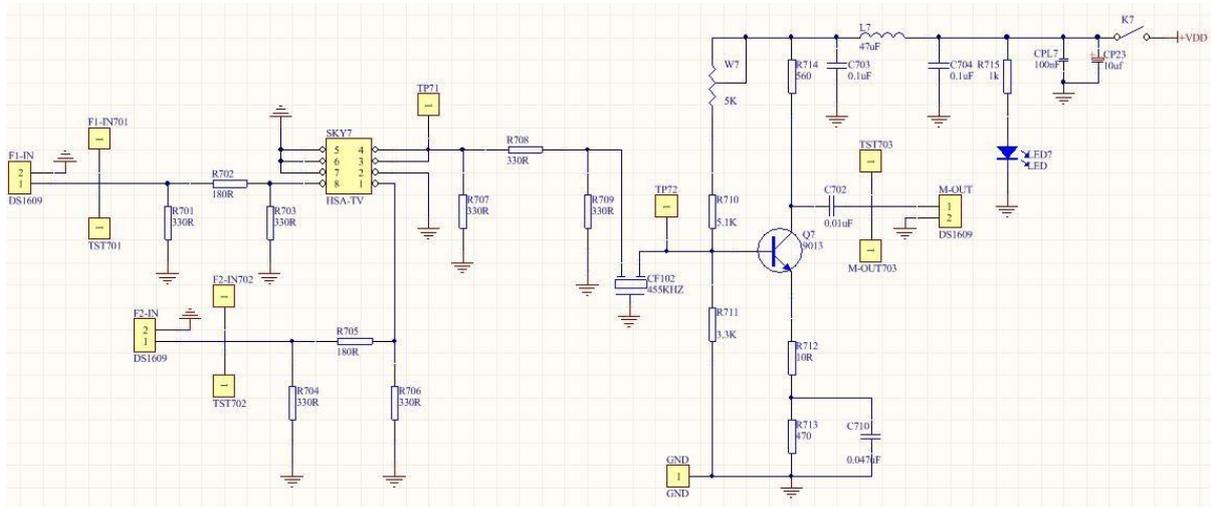


图 2.9.3 二极管混频电路原理图

2.9.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展, 需提前准备好: 高频电路实验系统、示波器和一套调试工具(除高频电路实验系统设备以外, 其它工具可结合实际情况配合实验使用);



2.9.4 实验步骤

1. 实验模块: LC 晶体振荡器、高频信号源、二极管混频电路。
2. 在 LC 晶体振荡器模块中, 拨档开关 SW901 状态为“10”、SW902 状态为“100”, 如图 2.9.4 所示。T9 处输出 10.245MHz, 幅度为 0.5V 的射频信号。用导线连接 LC 晶体振荡器模块的 T9 和二极管混频电路模块的 F2-IN。

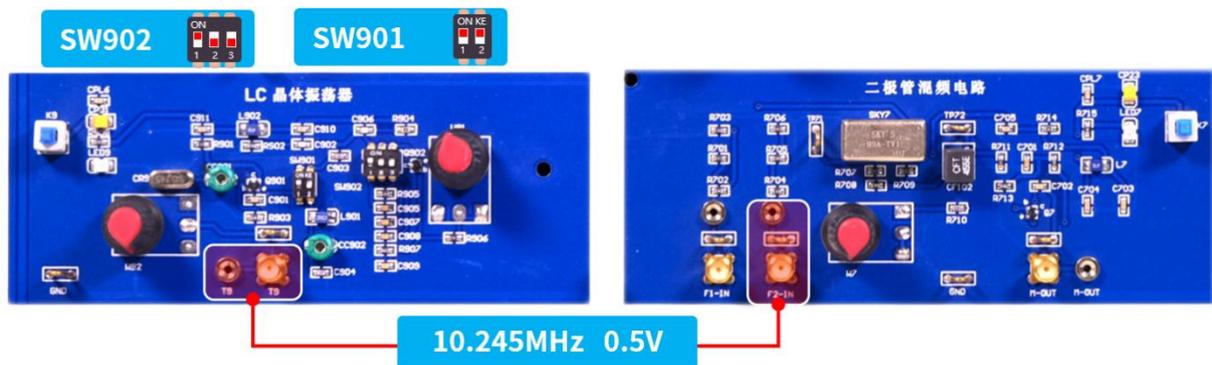


图 2.9.4 LC 晶体振荡器拨码设置与实验接线

3. 在高频信号源模块中，调节电位器 W81，让 OUT8_1 输出频率为 10.7MHz，幅度为 0.5V 的本振信号。用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和二极管混频电路模块的 F1-IN，验证混频器输出组合频率（可使用示波器频谱分析功能），用示波器从 M-OUT 观察输出波形。

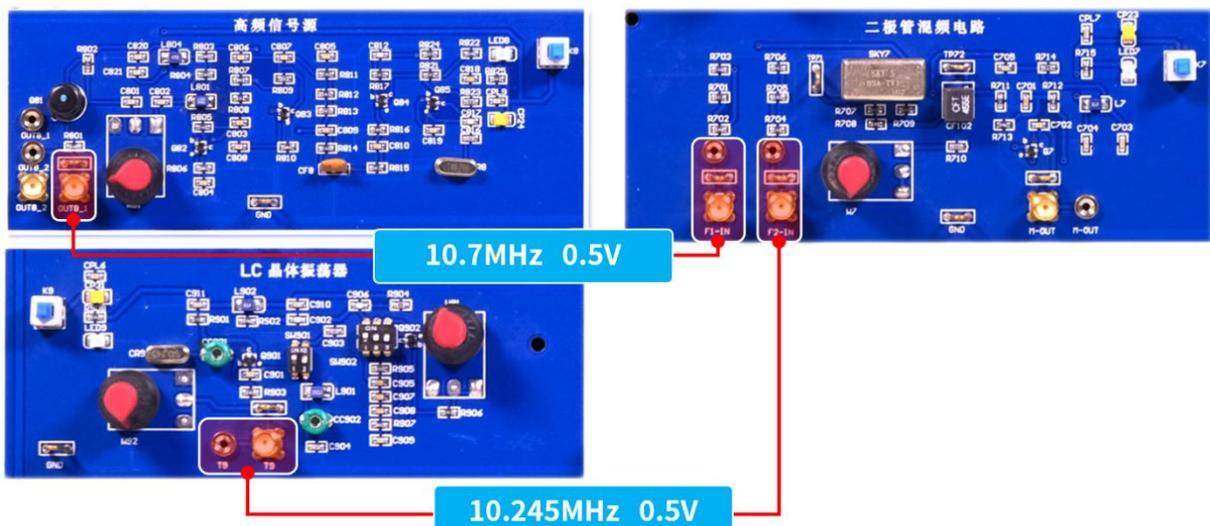


图 2.9.5 二极管开关混频器实验接线

4. 在 LC 晶体振荡器中，调整可变电容 CC902，使 T9 处输出的频率为 11.155MHz，即 F2-IN 输入的信号频率为 11.155MHz，保持 F1-IN 输入信号不变，观察 M-OUT 处的信号是否也为 455kHz 镜像干扰现象。

2.9.5 实验扩展

1. 整理所测得各频率分量的大小，并计算选频电路对中频以外的分量的抑制度。
2. 绘制从 M-OUT 处输出的波形。
3. 说明镜像干扰引起的后果，如何减小镜像干扰？

2.10 集成电路混频实验

2.10.1 实验分析

1. 了解模拟乘法器 MC1496 的结构和工作原理;
2. 掌握利用乘法器实现混频的原理及方法;
3. 了解混频器中的寄生干扰。

2.10.2 实验原理

集成模拟乘法器是完成两个模拟量相乘的电子器件。集成模拟乘法器 MC1496 的内部结构如图 10-1 所示。

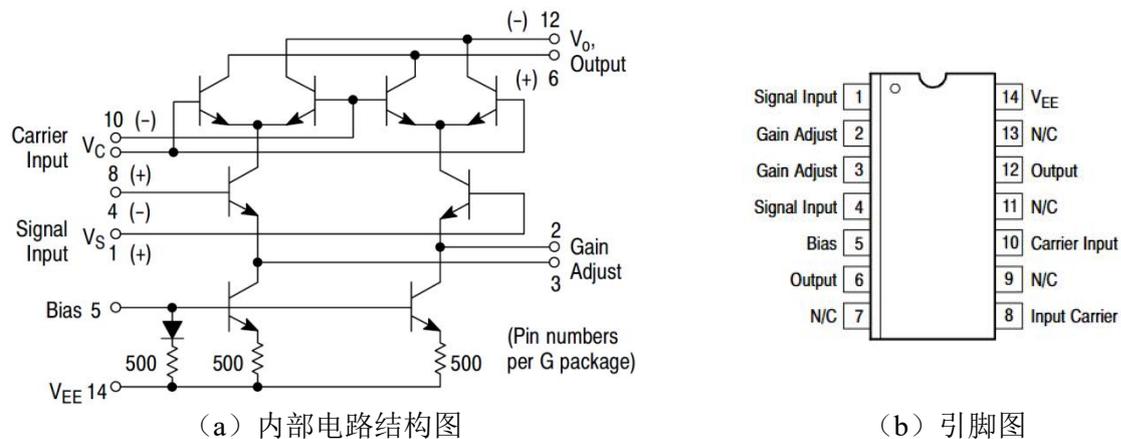


图 2.10.1 MC1496 的内部电路及引脚图

MC1496 是双平衡四象限模拟乘法器。内部由双差分放大器，单差分放大器以及激励、偏置等电路组成。引脚 8 与 10 接输入电压 U_X 端，1 与 4 接另一输入电压 U_Y ，输出电压 U_0 从引脚 6 与 12 输出。引脚 2 与 3 外接电阻 R_E ，对差分放大器 VT_5 、 VT_6 产生串联电流负反馈，以扩展输入电压 U_Y 的线性动态范围。引脚 14 为负电源端（双电源供电）或接地端（单电源供电），引脚 5 外接电阻 R_5 ，用来调节偏置电流 I_5 及镜像电流 I_0 的值。MC1496 静态工作点由外接元件确定。

用模拟乘法器实现混频，只要在 U_X 端和 U_Y 端分别加上两个不同频率的信号，则在 U_0 处输出差频信号，再经过带通滤波器取出中频信号，其原理方框图如图 2.10.2 所示。

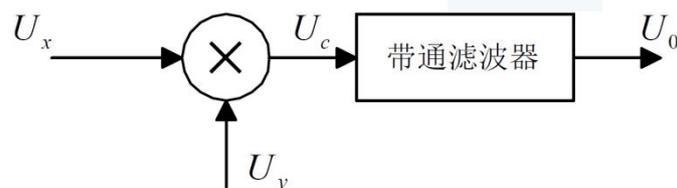


图 2.10.2 混频原理框图

若 $U_x(t) = U_s \cos \omega_s t$, $U_y(t) = U_0 \cos \omega_0 t$, 则

$$U_c(t) = KU_s U_0 \cos \omega_s t \cos \omega_0 t = \frac{1}{2} KU_s U_0 [\cos(\omega_0 + \omega_s)t + \cos(\omega_0 - \omega_s)t]$$

经带通滤波器后, 去差频:

$$U_0(t) = \frac{1}{2} KU_s U_0 \cos(\omega_0 - \omega_s)t$$

由 MC1496 模拟乘法器构成的混频器电路如图 2.10.3 所示:

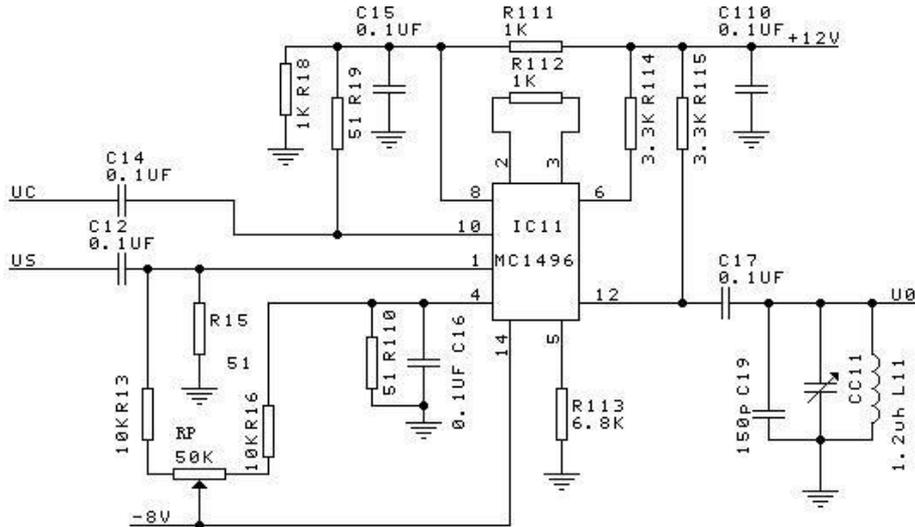


图 2.10.3 MC1496 构成的混频器 (参考图)

实验中, U_x 端输入信号的频率为 10.7MHz。 U_y 端输入信号的频率为 10.245MHz 的信号, 输出端接有带通滤波器。

本实验使用的电路模块的原理图如图 2.10.4 所示:

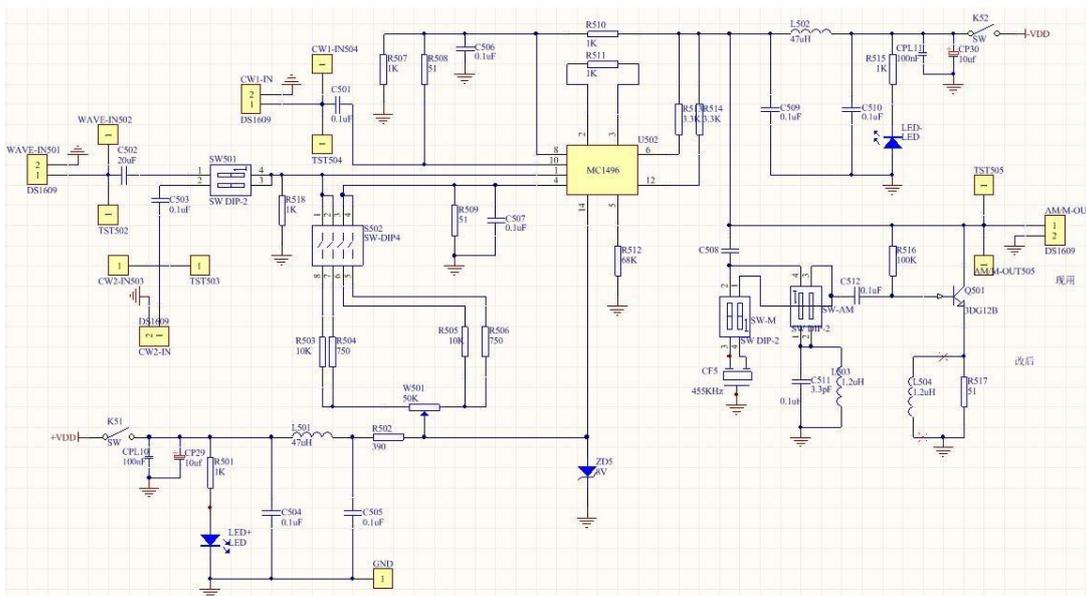


图 2.10.4 集成混频、平衡调幅电路原理图

2.10.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展,需提前准备好:高频电路实验系统、示波器和一套调试工具(除高频电路实验系统设备以外,其它工具可结合实际情况配合实验使用)。



2.10.4 实验步骤

1. 实验模块: 高频信号源、LC 晶体振荡器、集成混频平衡调幅电路。
2. 接通 220V 电源,打开实验箱开关,按下相应模块的开关,相应模块的电源指示灯点亮。
3. 将集成混频、平衡调幅电路模块的拨码置为如下状态: SW501: “01”, SW502: “1010”, SW-M: “11”, SW-AM: “00”, MC1496 构成混频器电路;

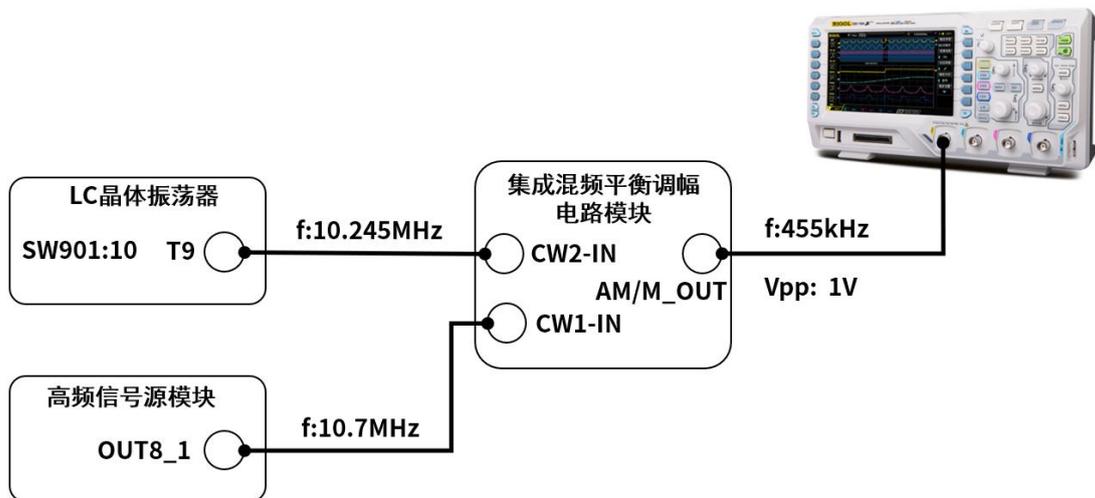


图 2.10.5 集成电路混频实验接线与测试 (SW901:10)

4. 用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和集成混频平衡调幅电路模块的 CW1-IN, 从 CW1-IN 处输入由高频信号源提供的 10.7MHz 的载波信号; 用导线连接 LC 晶体振荡

器模块的 T9 和集成混频、平衡调幅电路模块的 CW2-IN，将 LC 晶体振荡器模块中的 SW901 拨为“10”，使得 T9 处输出 10.245MHz，即 CW2-IN 处输入 10.245MHz 信号。用示波器和频率计在集成混频、平衡调幅电路模块的 AM/M-OUT 处观察混频输出波形，输出信号频率应为 455kHz（幅度可达 1V）。

5. CW1-IN 输入信号保持不变，将 LC 晶体振荡器模块中的 SW901 拨为“01”，使得 T9 处输出 11.155MHz，即 CW2-IN 处输入 11.155MHz 信号。用示波器和频率计在集成混频、平衡调幅电路模块的 AM/M-OUT 处观察镜像干扰输出波形，输出信号频率应为 455kHz（幅度可达 0.4V）。

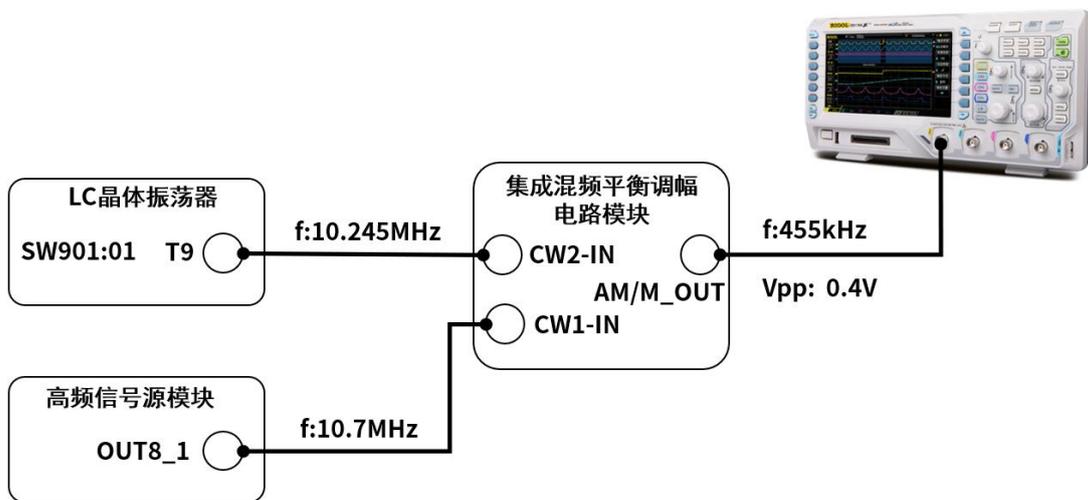


图 2.10.6 集成电路混频实验接线与测试 (SW901:01)

2.10.5 实验扩展

1. 根据检测结果，绘制出有关曲线和波形。
2. 对实验结果进行分析，了解本振频率、载波频率、和镜像干扰频率之间的关系。
3. 归纳并总结混频器的工作过程。

2.11 调幅同步检波电路实验

2.11.1 实验分析

1. 了解模拟乘法器 MC1496 的工作原理;
2. 掌握利用乘法器实现同步检波电路的原理及方法。

2.11.2 实验原理

振幅调制信号的解调过程称为检波,有包络检波和同步检波两种。对于有载波振幅调制信号的包络直接反映了调制信号的变化规律,可以用二极管包络检波的方法进行解调。而抑制载波的双边带或单边带振幅调制信号的包络不能直接反映调制信号的变化规律,所以无法用包络检波进行解调,必须采用同步检波方法。

同步检波又分为叠加型同步检波和乘积型同步检波。利用模拟乘法器的相乘原理,可以很方便的实现同步检波。工作原理如下:在乘法器的一个输入端输入振幅调制信号如抑制载波的双边带信号 $U_s(t) = U_{sm} \cos \omega_c t \cos \Omega t$,另一输入端输入同步信号(即载波信号) $U_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$,经乘法器相乘,可得输出信号 $U_0(t)$ 为:

$$\begin{aligned} U_0(t) &= K U_s(t) U_c(t) \\ &= \frac{1}{2} K_E U_{sm} U_{cm} \cos \Omega t + \frac{1}{4} K_E U_{sm} \cos(2\omega_c + \Omega)t \\ &\quad + \frac{1}{4} K_E U_{sm} U_{cm} \cos(2\omega_c - \Omega)t \end{aligned}$$

式中,第一项是所需要的低频调制信号分量,后两项为高频分量,可用低通滤波器滤掉,从而实现双边带信号的解调。

若输入信号 $U_s(t)$ 为单边振幅调制信号,及 $U_s(t) = \frac{1}{2} U_{sm} \cos(\omega_c + \Omega)t$,则乘法器的输出 $U_0(t)$ 为:

$$\begin{aligned} U_0(t) &= \frac{1}{2} K_E U_{sm} U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t \cos \omega_c t \\ &= \frac{1}{4} K_E U_{sm} \cos \Omega t + \frac{1}{4} K_E U_{sm} U_{cm} \cos(2\omega_c + \Omega)t \end{aligned}$$

式中,第一项是所需要的低频调制信号分量,第二项为高频分量,也可以被低通滤波器滤掉。

如果输入信号 $U_s(t)$ 为有载波振幅调制信号,同步信号为载波信号 $U_c(t)$,利用乘法器的相乘原理,同样也能实现解调。

设 $U_s(t) = U_{sm}(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t$, $U_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$,则输出电压 $U_0(t)$ 为:

$$\begin{aligned}
 U_0(t) &= K_E U_s(t) U_c(t) \\
 &= \frac{1}{2} K_E U_{sm} U_{cm} + \frac{1}{2} K_E m U_{cm} \cos \Omega t + \frac{1}{2} K_E U_{sm} U_{cm} \cos 2\omega_c t \\
 &\quad + \frac{1}{4} K_E m U_{sm} U_{cm} \cos(2\omega_c + \Omega)t \\
 &\quad + \frac{1}{4} K_E m U_{sm} U_{cm} \cos(2\omega_c - \Omega)t
 \end{aligned}$$

式中，第一项为直流分量，第二项是所需要的低频调制信号分量，后面三项为高频分量。利用隔直电容及低通滤波器可滤掉直流分量及高频分量，从而实现了有载波振幅调制信号的解调。

MC1496 模拟乘法器构成的同步检波解调器电路图 2.11.1 所示。其中 U_x 端输入同步信号或载波信号 $U_c(t)$ ， U_y 端输入已调波信号 $U_s(t)$ 。输出端接有由 R_{11} 与 C_6 、 C_7 组成的低通滤波器及隔直电容 C_8 ，所以该电路对有载波调幅信号及抑制载波的调幅信号均可实现解调。

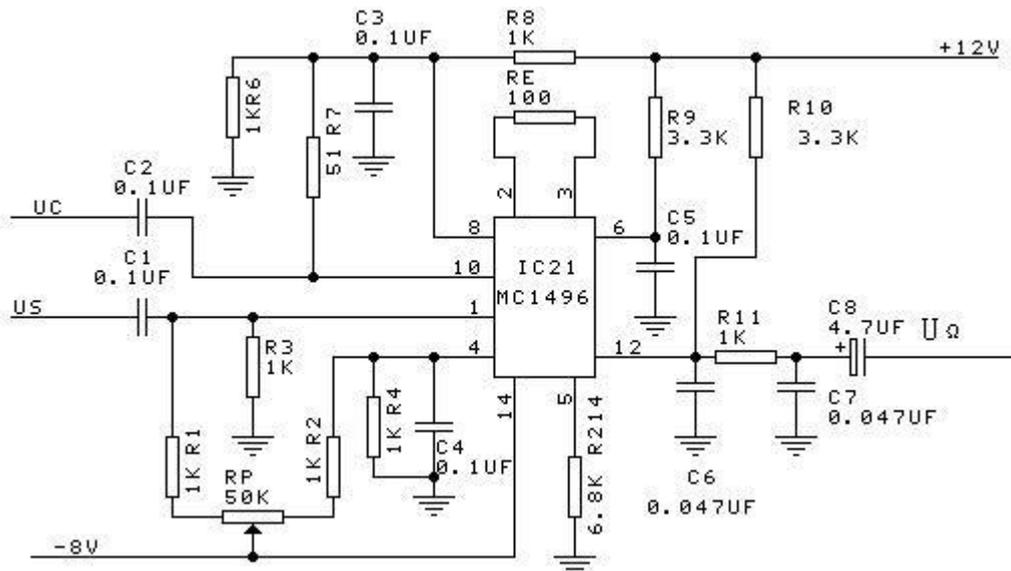
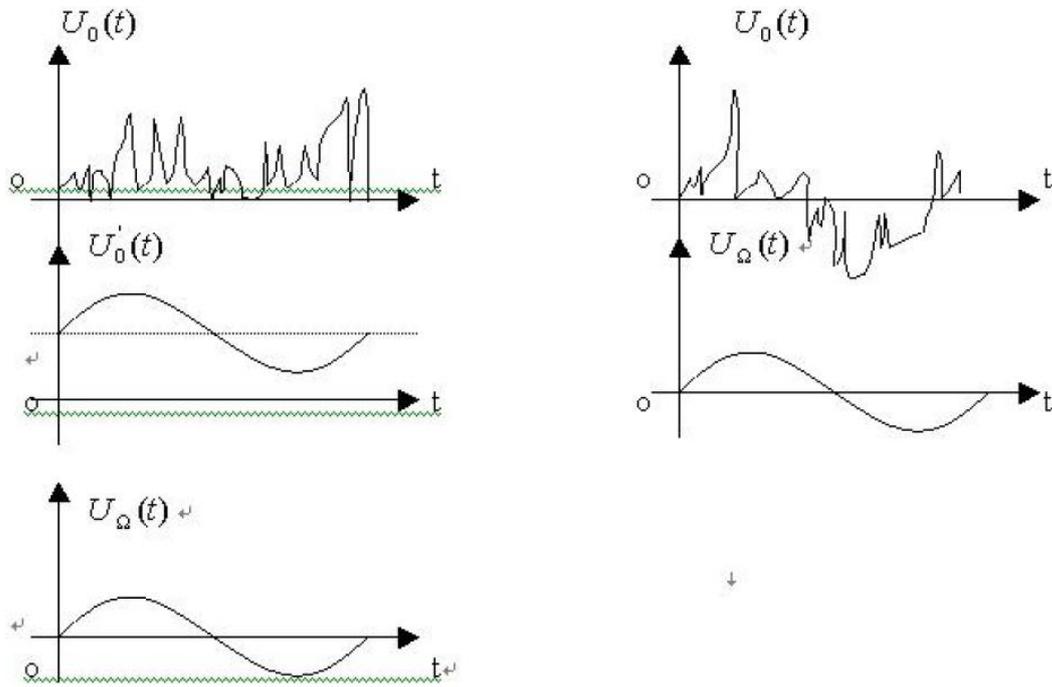


图 2.11.1 MC1496 构成的同步检波器（参考图）

从 U_x 端输入载波信号 U_c ，其 $f_c=10.7\text{MHz}$ ， $U_{CP-P}=100\text{mV}$ 。先令 $U_y=0$ ，调节平衡电位器 RP ，使输出 $U_0(t)=0$ ，即为平衡状态。再从 U_y 端输入有载波的调制信号 $U_s(t)$ ，载波频率 $f_c=10.7\text{MHz}$ ，调制信号频率 $f_\Omega=1\text{kHz}$ ， $U_{SP-P}=200\text{mV}$ ，调制度 $m=100\%$ 。这时乘法器的输出 $U_0(t)$ 经低通滤波器后的输出 $U_0(t)$ 再经隔直电容 C_8 后的输出 $U_\Omega(t)$ 的波形分别如图 2.11.2 (a) 所示。调节电位器 RP 可使输出波形 $U_0(t)$ 的幅度增大，波形失真减小。

若 $U_s(t)$ 为抑制载波的调制信号，经 MC1496 同步检波后的输出波形 $U_0(t)$ 如图 2.11.2

(b) 所示。



(a) 有载波信号解调

(b) 抑制载波信号的解调

图 2.11.2 解调器输出波形

本实验使用的电路模块的原理图如图 2.11.3 所示：

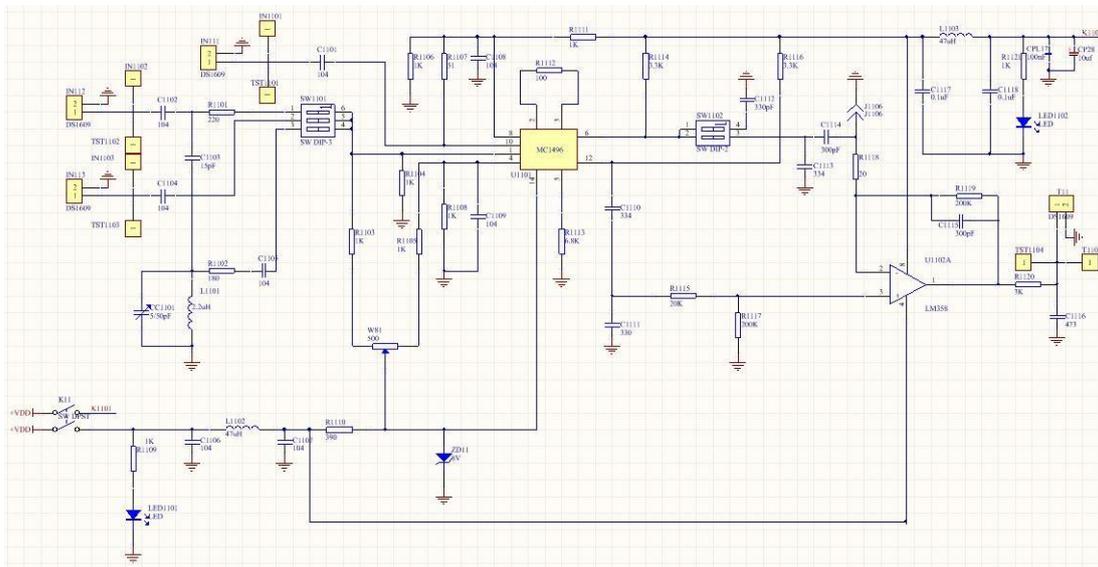


图 2.11.3 同步检波、鉴频电路原理图

2.11.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2.11.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、高频信号源、集成混频平衡调幅电路、同步检波鉴频电路。
2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关及相应模块的开关，相应 LED 点亮。
3. 将同步检波、鉴频电路模块的拨码置为如下状态：SW1101：“010”，SW1102：“10”，MC1496 构成的同步检波电路。

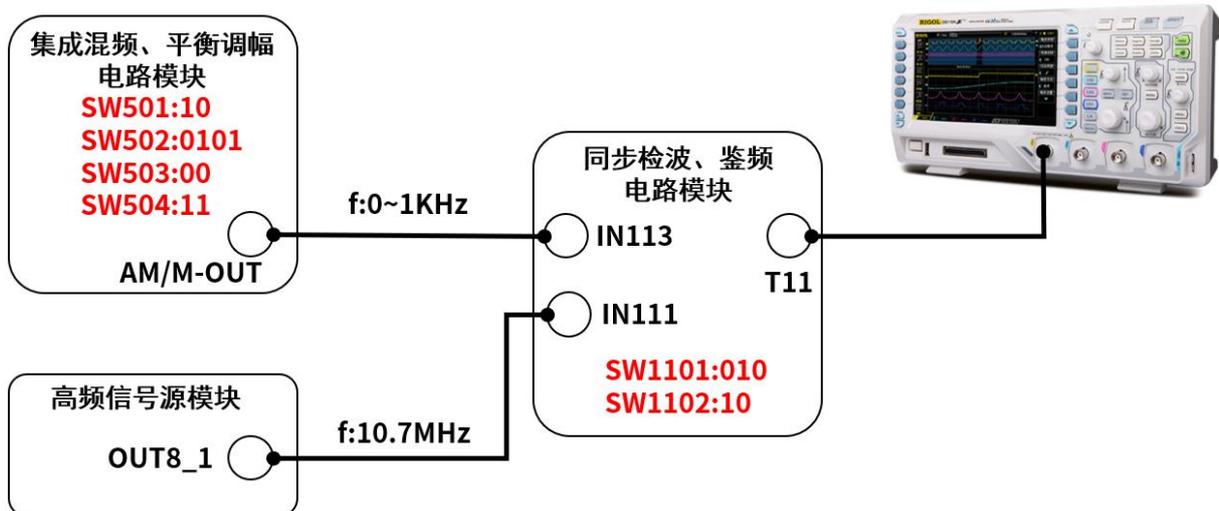


图 2.11.4 同步检波电路实验连接图

4. 用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和同步检波、鉴频电路模块 IN111，使 $U_s=0$ ，调节同步检波、鉴频电路模块的电位器 W1101 使在 T11 处观察的信号为 0。用

导线连接集成混频、平衡调幅电路模块的 AM/M-OUT 和同步检波、鉴频电路模块的 IN113, 参考 2.72.7.4 设置电路参数, 使在 AM/M-OUT 处输出抑制载波调幅信号, 这时从集成混频、平衡调幅电路模块的 T11 处用示波器应能观察到 $U_{\Omega}(t)$ 的波形, 仔细调节电位器 W1101 可使输出波形幅度增大, 波形失真减小。

2.11.5 实验扩展

1. 整理各项实验所得的数据, 绘制出有关曲线和波形;
2. 对实验结果进行分析。

2.12 幅度调制系统实验

2.12.1 实验分析

1. 了解模拟乘法器 MC1496 的工作原理;
2. 掌握利用乘法器实现平衡调幅电路的原理及方法。

2.12.2 实验原理

1. 基本工作原理

集成模拟乘法器 MC1496 的内部结构和封装见实验十部分。MC1496 是完成两个模拟量相乘的电子器件。在高频电子线路中, 振幅调制、同步检波、混频、倍频、鉴频、鉴相等调制与解调的过程, 均可视为两个信号相乘或包含相乘的过程。采用集成模拟乘法器实现上述功能比采用分离器件如二极管和三极管要简单的多, 而且性能优越。所以目前在无线通信、广播电视等方面应用较多。

设输入信号 $U_x = U_{xm} \cos \omega_x t$, $U_y = U_{ym} \cos \omega_y t$, 则 MC1496 乘法器的输出 U_0 与反馈电阻 R_E 及输入信号 U_x 、 U_y 的幅值有关。

- 1) 不接负反馈电阻 (脚 2 和 3 短接)

当 U_x 和 U_y 皆为小信号时, 由于三对差分放大器 (VT1, VT2, VT3, VT4 及 VT5, VT6) 均工作在线性放大状态, 则输出电压 U_0 可近似表示为

$$U_0 \approx \frac{I_0 R_L}{2U_T^2} U_x U_y = K_0 U_x U_y$$

$$= \frac{1}{2} K_0 U_{xm} U_{ym} [\cos(\omega_x + \omega_y)t + \cos(\omega_x - \omega_y)t]$$

式中, K 为乘法器的乘积系数, 与器件外接元件参数有关, 即 $K_0 = \frac{I_0 R_L}{2U_T^2}$; U_T 为温度的电压当量, 当 $T=300K$ 时, $U_T = \frac{KT}{q} = 26mV$; R_L 是输出负载电阻。

上式表明, 当输入均为小信号时, MC1496 可近似为一理想乘法器, 输出信号 U_0 中仅包含两个输入信号的和频与差频分量。当 U_y 为小信号, U_x 为大信号时, 由于双差分放大器 (VT1、VT2 和 VT3、VT4) 处于开关工作状态, 其电流波形将是对称的方波, 乘法器的输出电压 U_0 可近似表示为:

$$U_0 \approx K_0 U_x U_y$$

$$= K_0 U_{gm} \sum_{n=1}^{\infty} A_n [\cos(n\omega_x + \omega_y)t + \cos(n\omega_x - \omega_y)t] \quad (n \text{ 为奇数})$$

输出信号 U_0 中, 包含 $\omega_x \pm \omega_y, 3\omega_x \pm \omega_y, 5\omega_x \pm \omega_y, \dots, (2n-1)\omega_x \pm \omega_y$ 等频率分量。

2) 接入负反馈电阻

由于 R_E 的接入, 扩展了 U_y 的线性动态范围, 所以器件的工作状态主要由 U_x 决定, 分析表明:

当 U_x 为小信号 ($< 26mV$) 时, 输出电压 U_0 可表示为

$$U_0 = \frac{R_L}{R_E U_T} U_x U_y = \frac{1}{2} K_E U_{xm} U_{ym} [\cos(\omega_x + \omega_y)t + \cos(\omega_x - \omega_y)t]$$

式中: $K_E = \frac{R_L}{R_E U_T}$

当接入负反馈电阻 R_E 后, U_x 为小信号时, MC1496 近似为一理想的乘法器, 输出信号 U_0 中只包含两个输入信号的和频与差频。

当 U_x 为大信号 ($> 100mV$) 时, 输出电压 U_0 可近似表示为:

$$U_0 \approx \frac{2R_L}{R_E} U_y$$

上式表明, U_x 为大信号时, 输出电压 U_0 与输入信号 U_x 无关。

2. 振幅调制原理

振幅调制是使载波信号的峰值正比于调制信号的瞬时值的变换过程。通常载波信号为高频信号, 调制信号为低频信号。设载波信号的表达式为 $U_c(t) = U_{cm} \cos \omega_c t$, 调制信号的表达式为 $U_c(t) = U_{cm} \cos \Omega t$, 则调幅信号的表达式为:

$$U_0(t) = U_{cm} (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t$$

$$= U_{cm} \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t$$

式中 $m = \frac{U_{\Omega m}}{U_{cm}}$ 为调幅系数; $U_{cm} \cos \omega_c t$ 为载波信号; $\frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t$ 为上边带信号; $\frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t$ 为下边带信号。

它们的波形及频谱如图 2.7.1 所示。

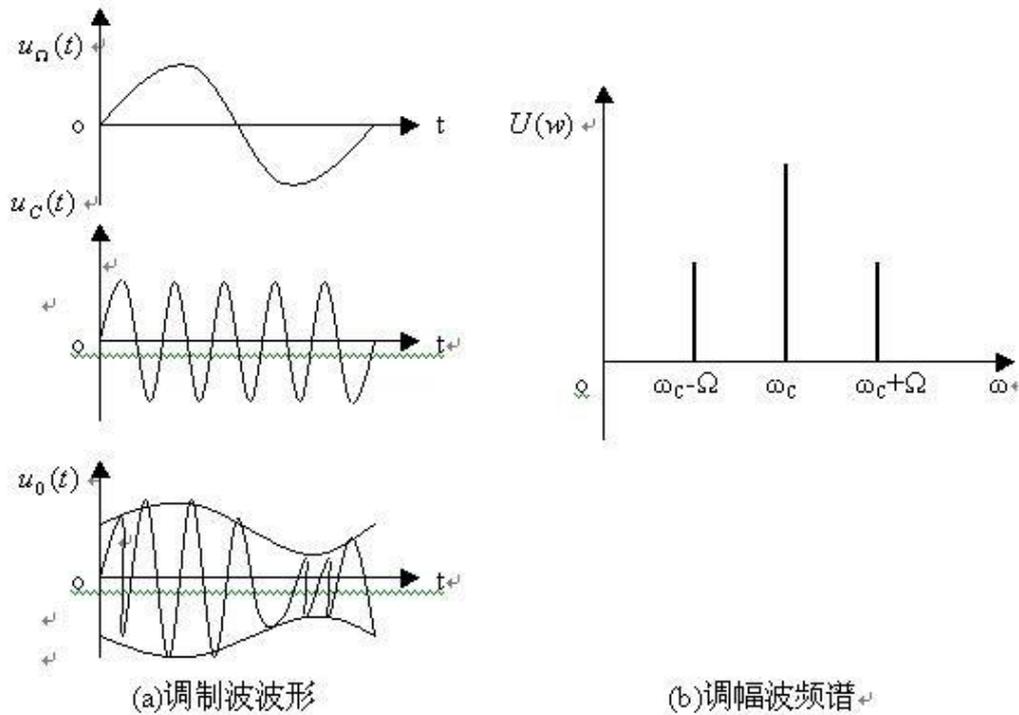


图 2.12.1 调制波形及频谱

由图 2.7.1 可见，调幅波中载波分量占有很大比重，因此信息传输效率较低，称这种调制为有载波调制。为提高信息传输效率，广泛采用抑制载波的双边带或单边带振幅调制。

双边带调幅波的表达式为：

$$U_0(t) = \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t + \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t$$

$$= m U_{cm} \cos \omega_c t \cos \Omega t$$

单边带调幅波的表达式为：

$$U_0(t) = \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c + \Omega)t \quad (\text{上边带})$$

或：

$$U_0(t) = \frac{1}{2} m U_{cm} \cos(\omega_c - \Omega)t \quad (\text{下边带})$$

MC1496 构成的振幅调制器电路如图 2.7.2 所示。

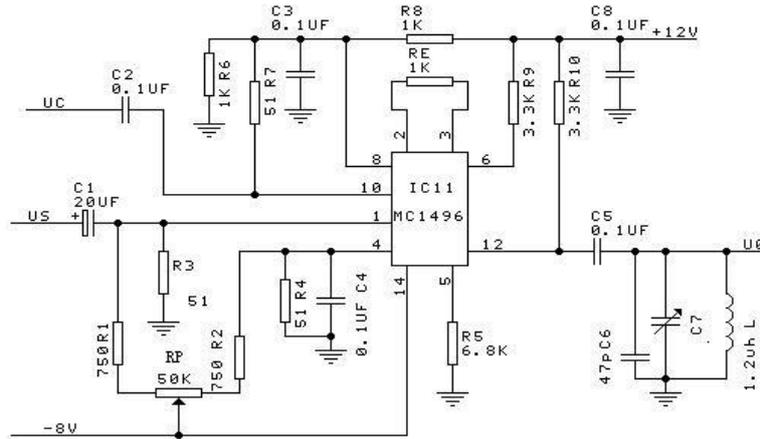


图 2.12.2 MC1496 构成的调幅器 (参考图)

在图 2.7.2 中, 载波信号 U_c 经耦合电容 C_2 从 U_x 端输入, C_3 为高频旁路电容, 使 8 脚接地。调制信号 U_s 经低频耦合电容 C_1 从 U_y 端输入, C_4 为低频旁路电容, 使 4 脚接地。调幅信号 U_0 从 12 脚单端输出。器件采用双电源供电方式, 所以 5 脚的偏置电阻 R_5 接地, 可计算器件的静态偏置电流 I_5 , 即

$$I_5 = I_0 = \frac{|-U_{EE}| - 0.7V}{R_5 + 500\Omega} = 1mA$$

脚 2 与 3 脚之间接入负反馈电阻 R_E , 以扩展调制信号的 U_s 的线性动态范围, R_E 增大, 线性范围增大, 但乘法器的增益随之减少。

电阻 R_6 、 R_7 、 R_8 及 R_L 为器件提供静态偏置电压, 保证器件内部的各个晶体管工作在放大状态。对于图 2.7.2 所示电路参数, MC1496D 的静态 ($U_c=0$, $U_\Omega=0$) 工作电压为表 2.7.1 所示。

表 2.12.1 MC1496 静态工作电压

u1	u2	u3	u4	u5	u6	u8	u10	u12
0V	-0.7V	-0.7V	0V	-6.8V	8.6V	6V	6V	8.6V

R_1 、 R_2 与电位器 RP 组成平衡调节电路, 改变 RP 可以使乘法器实现抑制载波的振幅调制或有载波的振幅调制, 操作过程如下:

(1) 抑制载波振幅调制

U_x 端输入载波信号 $U_c(t)$, 其频率 $f_c=10.7MHz$, $U_{CP-P}=50mV$ 。 U_y 端输入调制信号 $U_s(t)$, 其频率 $f_\Omega=1kHz$, $U_{\Omega P-P}=0$ 。调节 RP , 使输出 $U_0=0$ (此时 $U_1 = U_4$)。

逐渐增加 $U_{\Omega P-P}$, 则输出信号 $U_0(t)$ 的幅度逐渐增大, 最后出现如图 2.7.3 (a) 所示

的抑制载波的调幅信号。由于器件内部参数不可能完全对称，致使输出出现泄漏信号。
脚 1 和 4 分别接电阻 R3 和 R4 可以较好地抑制载波泄漏信号和改善温度性能。

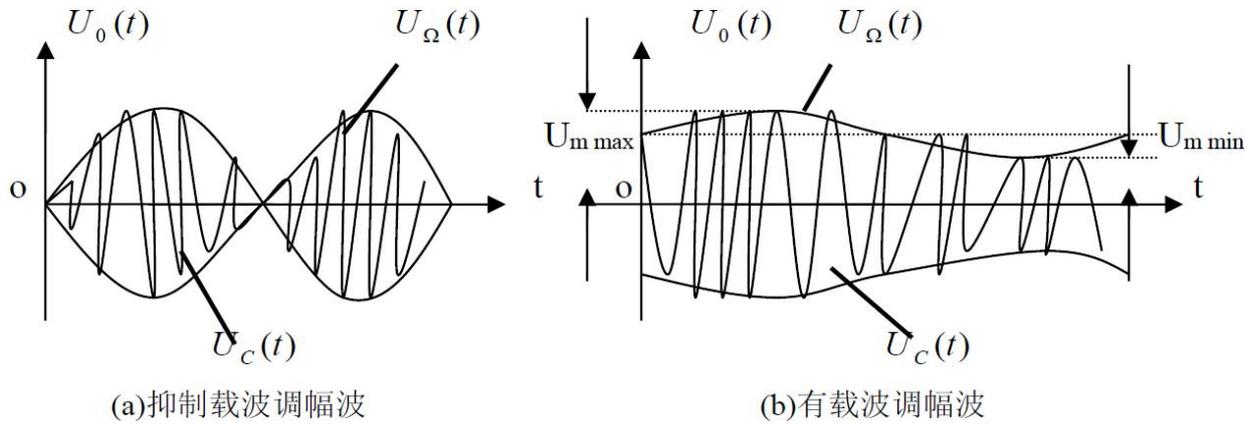


图 2.12.3 乘法器输出的调幅波

(2) 有载波振幅调制

U_x 端输入载波信号 $U_c(t)$ ， $f_c=10.7\text{MHz}$ ， $U_{CP-P}=50\text{mV}$ ，调节平衡电位器 RP，使输出信号 $U_0(t)$ 中有载波输出（此时 U_1 与 U_4 不相等）再从 U_y 端输入调制信号，其 $f_\Omega=1\text{KHz}$ ，当 U_{CP-P} 由零逐渐增大时，则输出信号 $U_0(t)$ 的幅度发生变化，最后出现如图 2.7.3 (b) 所示的有载波调幅信号的波形，调幅系数 m 为：

$$m = \frac{Um_{\max} - Um_{\min}}{Um_{\max} + Um_{\min}} \times 100\%$$

式中， Um_{\max} —调幅波幅度的最大值； Um_{\min} —调幅波幅度的最小值。本实验使用的

电路模块的原理图如图 2.7.4 所示，

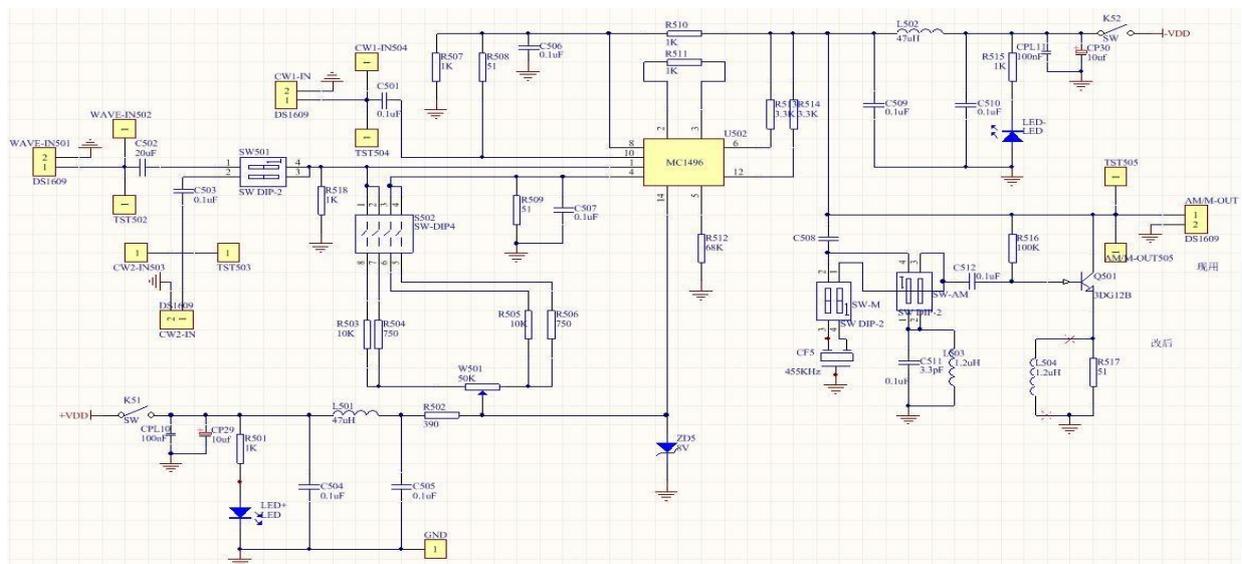


图 2.12.4 集成混频、平衡调幅电路原理图

2.12.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2.12.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、高频信号源、集成混频平衡调幅电路。
2. 接通220V 电源，打开实验箱开关即各个模块开关，相应 LED 点亮。
3. 将集成混频、平衡调幅电路模块的拨码置为如下状态：SW501：“10”，SW502：“0101”， SW503：“00”，SW504：“11”，MC1496 构成平衡调幅电路。

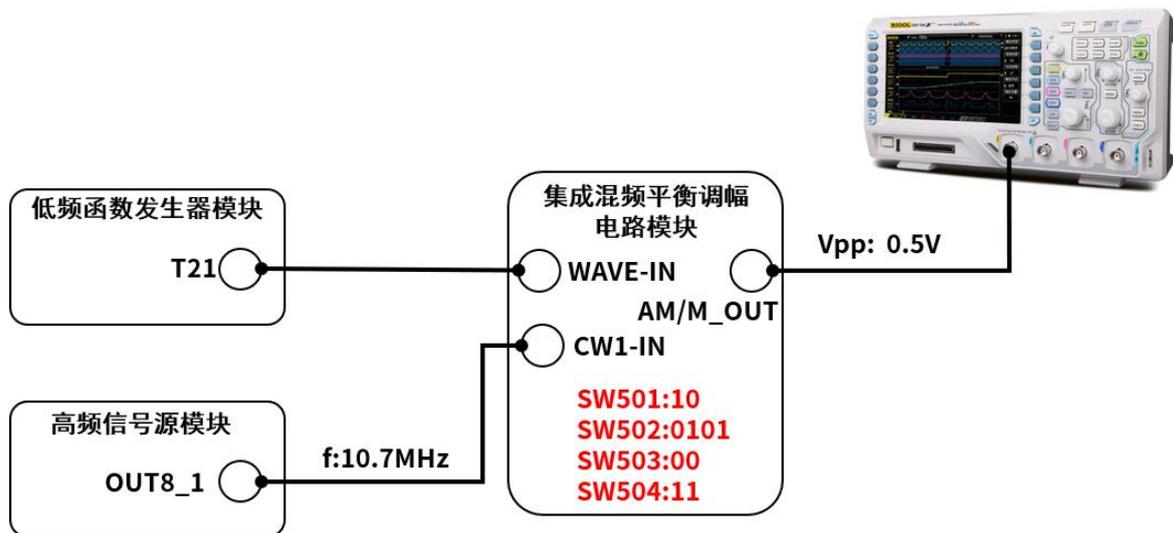


图 2.12.5 平衡调幅电路实验接线

4. 用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和集成混频、平衡调幅电路模块的 CW1-IN，从 CW1-IN 处输入由高频信号源提供的 10.7MHz 的载波信号；用导线连接低频函数发生器模块的 T21 和集成混频、平衡调幅电路模块的 WAVE-IN，从 WAVE-IN 处

输入由低频函数发生器模块提供的调制信号，用示波器在 AM/M-OUT 处观察输出的调幅波形（幅度可达 0.5V）。

5. 当 $U_c(t)=0$ 、 $U_s(t)=0$ 时，测试 MC1496 各管脚电压，看是否与表 2.7.1 中的值相符。

6. CW1-IN 输入信号保持不变，从 WAVE-IN 处输入幅度为 0 的 1kHz 调制信号。调节集成混频、平衡调幅电路模块的可调电阻 W501，使在 AM/M-OUT 处测试的信号 $U_0(t)=0$ 。逐渐增大调制信号的幅度，直至出现抑制载波的调幅信号出现。

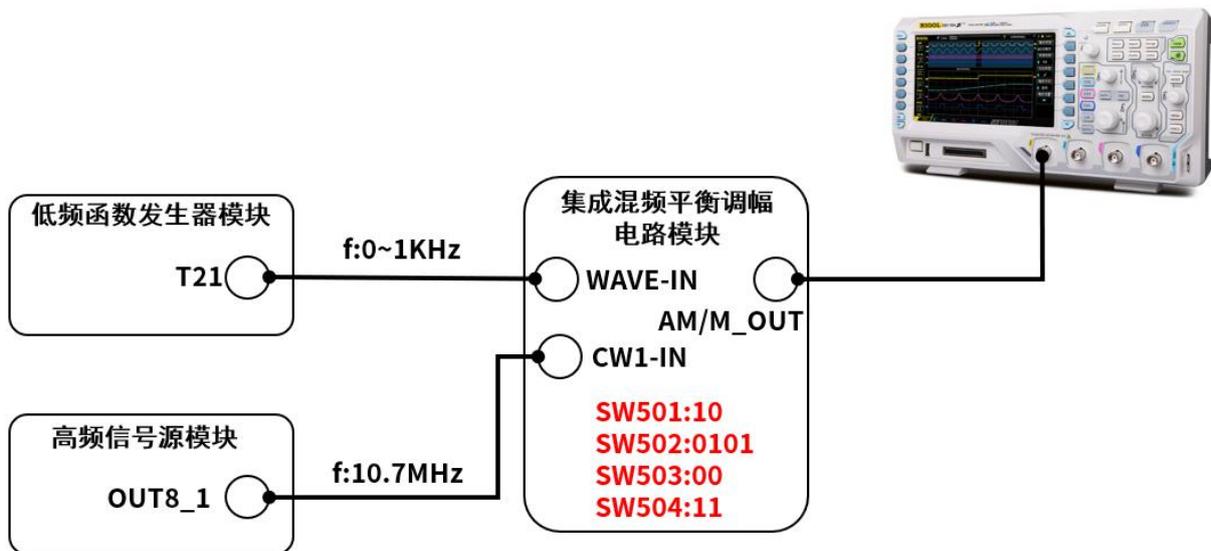


图 2.12.6 平衡调幅电路实验接线（调整输入低频信号）

7. 在步骤 6 的基础上调节 W501，使输出信号中有载波存在，则输出有载波的振幅调制信号。

2.12.5 实验扩展

1. 整理各项实验所得的数据，绘制出有关曲线和波形。
2. 对实验结果进行分析。
3. 分析为什么在平衡调幅实验中得不到载波绝对为零的波形？

2.13 调幅峰值包络检波电路实验

2.13.1 实验分析

1. 理解并掌握大信号检波工作原理;
2. 观察检波器电路参数对输出信号失真的影响。

2.13.2 实验原理

当输入信号较大(大于0.5伏)时,利用二极管单向导电特性对振幅调制信号的解调,称为大信号检波。大信号检波原理电路如图 2.13.1(a)所示。检波过程如下:在高频信号电压的正半周时,二极管正向导通并对电容器 C 充电,由于二极管的正向导通电阻很小,所以充电电流 i_d 很大,使电容器上的电压 V_c 很快就接近高频电压的峰值。

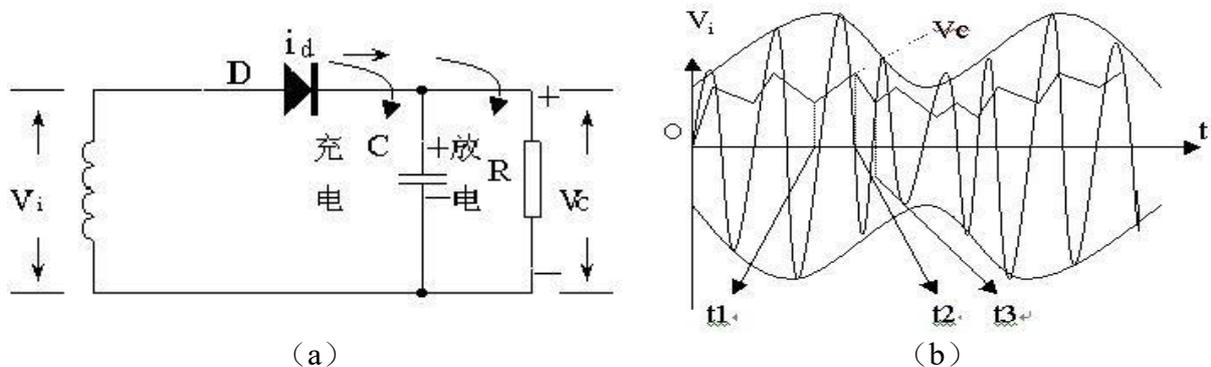


图 2.13.1 二极管检波器的原理图和波形图

这个电压建立后,通过信号源电路,又反向地加到二极管 D 的两端。这时二极管导通与否,由电容器 C 上的电压 V_c 和输入信号电压 V_i 共同决定。当高频信号的瞬时值小于 V_c 时,二极管处于反向偏置,管子截止,电容器就会通过负载电阻 R 放电。由于放电时间常数 RC 远大于调频电压的周期,所以放电速度很慢。当电容器上的电压下降不多时,载波信号第二个正半周的电压又超过二极管上的负压,使二极管又导通。如图 2.13.1(b) 中的 t_1 至 t_2 的时间为二极管导通的时间,在此时间内又对电容器充电,电容器的电压又迅速接近第二个高频电压的最大值。

在图 2.13.1(b) 中的 t_2 至 t_3 时间为二极管截止的时间,在此时间内电容器又通过负载电阻 R 放电。这样不断地循环反复,就得到图 2.13.1(b) 中电压 V_c 的波形。因此只要充电足够快(充电时间常数 $R_d \cdot C$ 足够小),而放电时间常数足够慢(放电时间常数 RC 足够),满足 $R_d \cdot C \ll RC$,就可使输出电压 V_c 的幅度接近于输入电压 V_i 的幅度,即传输系数接近 1。另外,由于正向导电时间很短,放电时间常数又远大于高频电

压周期,所以输出电压 V_c 的起伏是很小的,可看成与高频调幅波包络基本一致。而高频调幅波波包络又与原调制信号的形状相同,故输出电压 V_c 就是原来的调制信号,达到了解调的目的。

根据上述工作特点,大信号检波又称峰值包络检波。理想情况下,峰值包络检波器的输出波形应与调幅波包络线的形状完全相同。但实际上二者之间总会有一差距,亦即检波器输出波形有某些失真。

本实验可以观察到该检波器的两种特有失真:即惰性失真和负峰切割失真。

惰性失真是由于负载电阻 R 与负载电容 C 选得不合适,使放电时间常数 RC 过大引起的。惰性失真又称对切割失真,如图 2.13.2 所示。

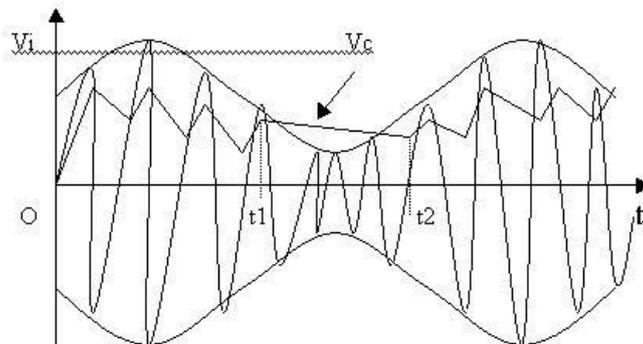


图 2.13.2 惰性失真

如图中 t_1 至 t_2 时间内,由于调幅波的包络下降,电容 C 上的电荷不能很快地随调幅波包络变化,而输入信号电压 V_i 总是低于电容 C 上的电压 V_c ,二极管始终处于截止状态,输出电压不受输入信号电压控制,而是取决于 RC 的放电,只有当输入信号电压的振幅重新超过输出电压时,二极管才重新导电。为了避免这种失真,理论分析证明, $R \cdot C$ 的大小应满足下列条件:

$$R \cdot C < \frac{\sqrt{1 - M_a^2}}{M_a \Omega_{\max}}$$

式中 M_a 是调制系数; Ω_{\max} 是被检信号的最高调制角频率。

负峰切割失真是由于检波器的直流负载电阻 R 与交流负载电阻相差太大引起的一种失真。

检波器通过耦合电容 C_c 与音频功率放大器相连。如图 2.13.3 所示。图中 C_c 是耦合电容,容量较大; R_{i2} 是下一级电路的输入电阻。由图可见:检波器的直流负载电阻为 R_L 。由于 C_c 的容量较大,对音频来说,可以认为是短路。

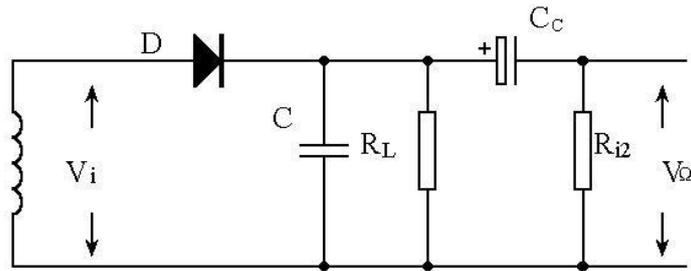


图 2.13.3 接有交流负载的检波器

因此，检波器的交流负载电阻 R_{i2} 等于 R 与 R_{i2} 的并联值，即：

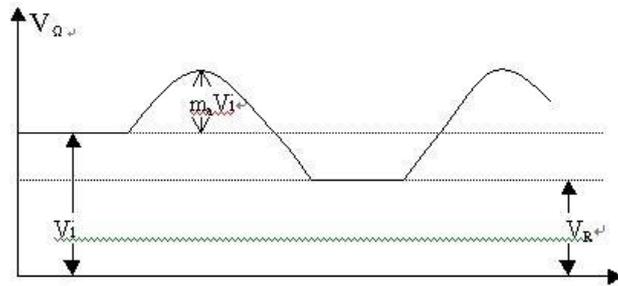


图 2.13.4 负峰切割失真

为了消除该失真， R 和 R_Q 应满足下列条件：

实验电路中，调制信号从IN63处输入，D14为检波管，R1402、R1403为检波器的直流负载，C1401、R1401、C1402组成 π 型低通滤波器，C1403为耦合电容，R1404、R1405、R1406为下级输入电阻。

本实验使用的电路模块的原理图如图 2.13.5 所示：

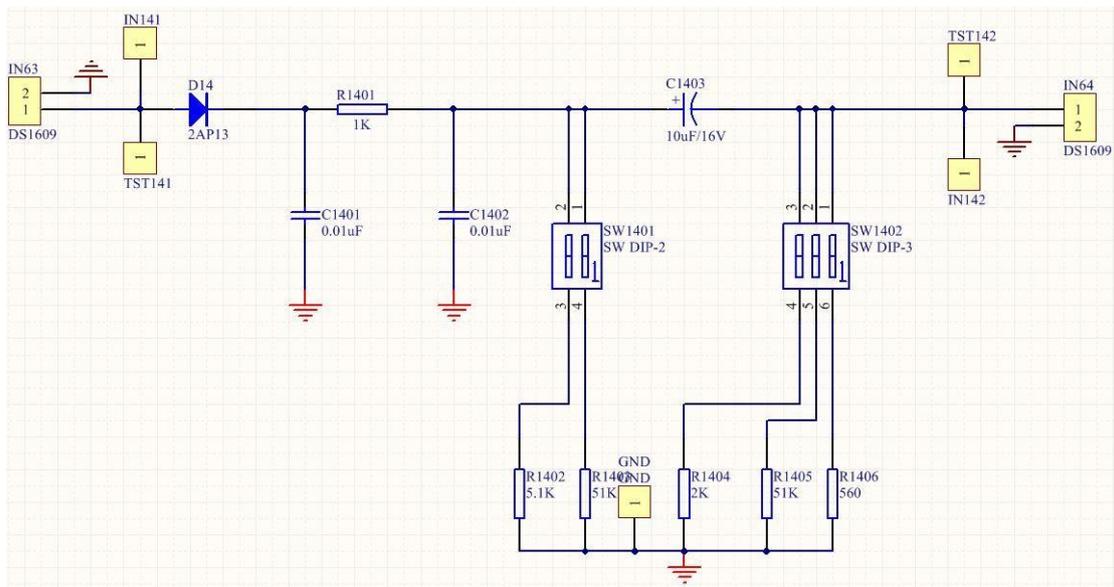


图 2.13.5 大信号检波电路原理图

2.13.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2.13.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、高频信号源、集电极调幅电路、大信号检波电路。
2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关，按下相应模块的开关，相应电源指示灯 LED 点亮。
3. 用导线连接低频函数发生器模块的 T21 和集电极调幅电路模块的 WAVE-IN，用导线连接高频信号源模块的 OUT8_1 和集电极调幅电路模块的 CW-IN。参考实验七调节电路参数（调节 TA601、TA602 的磁芯使 AM-OUT 处输出信号最大且不失真），使集电极调幅电路模块的 AM-OUT 输出载波频率为 10.7MHz，峰峰值为 2V 的调幅波。

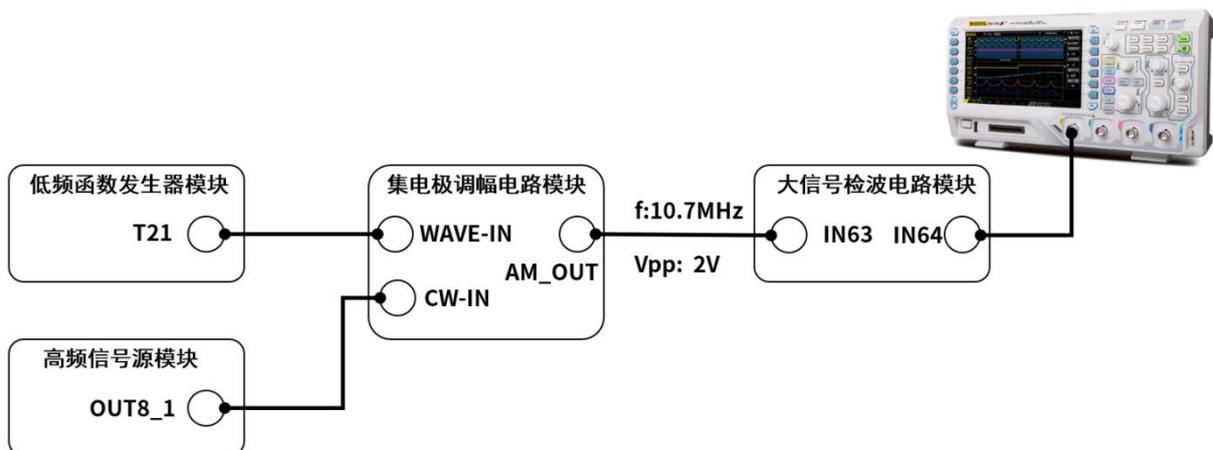


图 2.13.6 大信号检波实验接线

4. 用导线连接集电极调幅电路模块的 AM-OUT 和大信号检波电路模块的 IN63，

从 IN63 输入载波频率为 10.7MHz,峰峰值为 2V 的调幅波。在大信号检波电路中,将 SW1401 置为“10”,分别将 SW1402 置为“001”“010”“100”观察检波器输出波形与调幅系数 M_a 的关系,若观察到的负峰切割波形失真不明显可加大 M_a (参考);

2.13.5 实验扩展

1. 整理实验所得数据;
2. 画出不失真和各种失真的调幅波波形;
3. 画出当参数不同时,各种检波器的输出波形。

2.14 变容二极管调频电路实验

2.14.1 实验分析

1. 掌握变容二极管调频的工作原理；
2. 学会测量调频信号的频偏及调制灵敏度。

2.14.2 实验原理

调频就是把用基带信号控制载波的瞬时频率，使其按基带信号的规律变化。设基带调制信号为： $u_{\Omega}(t) = V_{\Omega} \cos \Omega t$ ，载波信号为： $a(t) = A_0 \cos \omega_0 t$ 。根据定义，调频时载波的瞬时频率 $\omega(t)$ 随 $u_{\Omega}(t)$ 成线性变化，即：

$$\omega(t) = \omega_0 + K_f V_{\Omega} \cos \Omega t$$

则调频波的数字表达式如下：

$$a(t) = A_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{K_f V_{\Omega}}{\Omega} \sin \Omega t\right)$$

式中， $\Delta\omega = K_f V_{\Omega}$ 是调频波瞬时频率的最大偏移；比例常数 K_f 称为调制灵敏度，代表单位调制电压所产生的频偏。

$$m_f = \frac{K_f V_{\Omega}}{\Omega} = \frac{\Delta\omega}{\Omega} = \frac{\Delta f}{F}$$

称为调频指数，是调频瞬时相位的最大偏移，它的大小反映了调制深度。

最简便、最常用产生调频信号方法是利用变容二极管的特性直接产生调频波，其原理电路如图 2.14.1 所示。

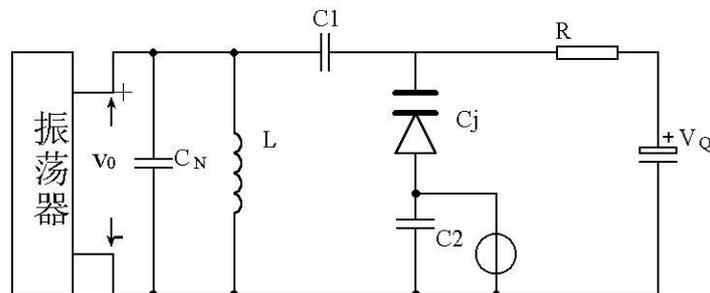


图 2.14.1 变容二极管调频原理电路

变容二极管利用 PN 结的结电容制成，在反偏电压作用下呈现一定的结电容（势垒电容），而且这个结电容能灵敏地随着反偏电压的大小在一定范围内变化，一般用 $C_j \sim V_R$ 关系曲线表示变容二极管的特性，如图 2.14.2 所示。

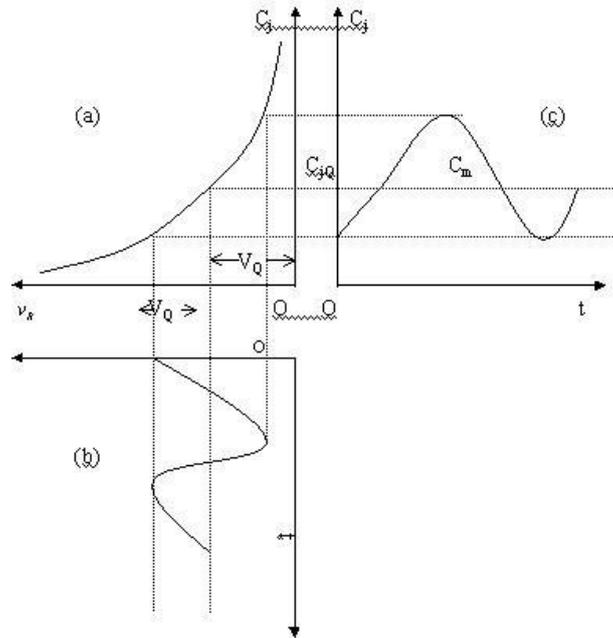


图 2.14.2 用调制信号控制变容二极管结电容

由图 2.14.2 可见，未加调制电压时，直流反偏 V_Q 所对应的结电容为 C_{jQ} ；当反偏增加时， C_j 减小；反偏减小时， C_j 增大，其变化具有一定的非线性，当调制电压较小时，近似为工作在 $C_j \sim V_R$ 曲线的线性段， C_j 将随调制电压线性变化当调制电压较大时，曲线的非线性不可忽略，它将给调频带来一定的非线性失真。由于电路的振荡频率随调制电压线性变化，从而实现了调频。其频偏 Δf 与回路的中心频率 f_0 成正比，与结电容变化的最大值 C_m 成正比，与回路的总电容 C_0 成反比。

在本实验电路中，使用 12V 供电，振荡器 Q101 使用 9013，变容管使用 Bb910，Q102 为隔离缓冲级。电路的主振频率 $f_0=10.7\text{MHz}$ ，最大频偏 $f_m=\pm 20\text{KHz}$ 。由 R101、R102、W101、R103 组成变容二极管的直流偏压电路。C104、C105、C106 组成变容二极管的不同接入系数。WAVE-IN 为调制信号输入端，由 L102、C110、C108、C107、C109 和振荡管组成 LC 振荡电路。

本实验使用的电路模块的原理图如图 2.14.3 所示，

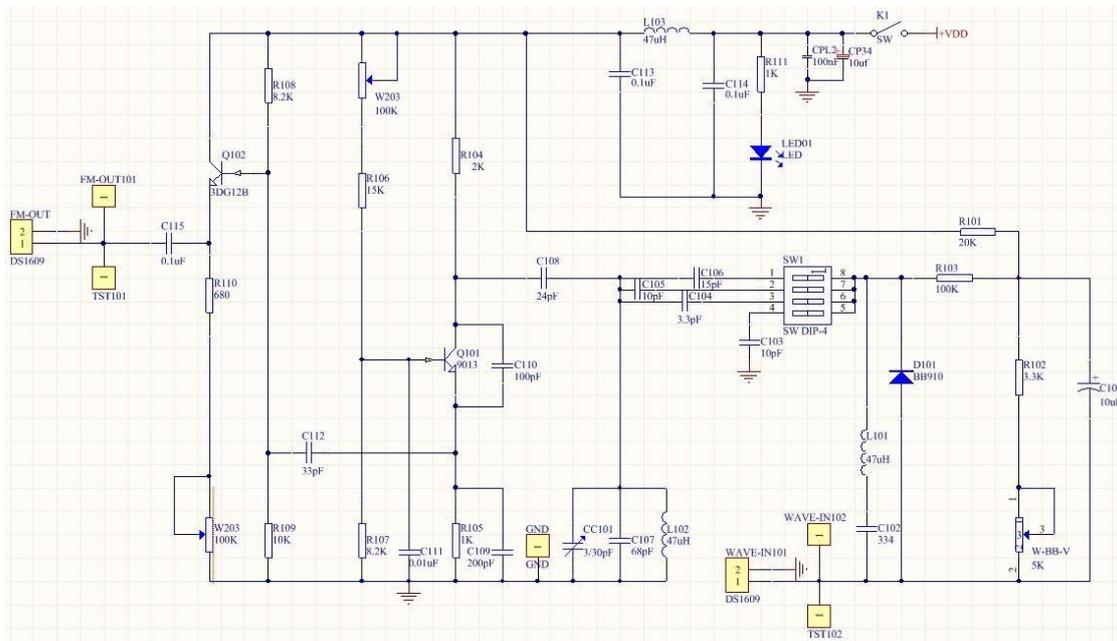


图 2.14.3 变容二极管调频电路原理图

2.14.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展,需提前准备好:高频电路实验系统、示波器和一套调试工具(除高频电路实验系统设备以外,其它工具可结合实际情况配合实验使用)。



2.14.4 实验步骤

1. 实验模块: 低频函数发生器、变容二极管调频电路。
2. 接通 220V 电源,打开实验箱开关,按下相应模块的开关,相应模块的电源指示灯点亮。
3. 在变容二极管调频电路模块中,用示波器在 FM-OUT 处观察振荡波形,调节电位器 W103 使波形不失真。调节变压器 L102,使振荡频率为 10.7MHz。

4. 用导线连接低频函数发生器模块的 T21 或 T22 和变容二极管调频电路模块的 WAVE-IN, 从 WAVE-IN 处输入由低频函数发生器模块提供的 1kHz 的正弦信号作为调制信号, 此时能观测到一条正弦带。如果用方波调制则在示波器上可看到两条正弦波, 这两条正弦波之间的相差随调制信号大小而变。

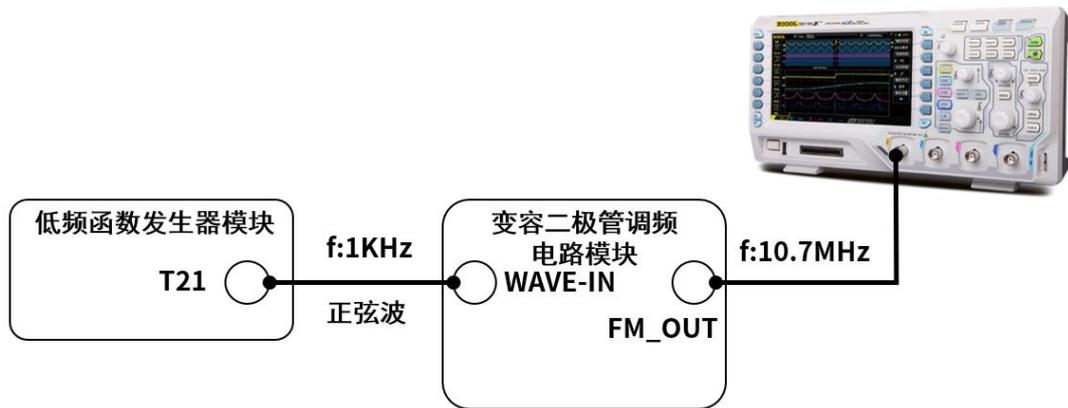


图 2.14.4 变容二极管调频接线与测试图

5. 在变容二极管调频电路模块中, 分别将拨码 SW1 置为“0010”、“0100”、“1000”、“0110”、“1100”、“1010”, 重做上一步实验。
6. 观察频偏与直流反偏电压的关系 (需频谱仪观察效果)。
7. 观察频偏与调制信号频率的关系 (需频谱仪观察效果)。

2.14.5 实验扩展

1. 整理 LC 调频所测的数据, 绘出观察到的波形;

2.15 集成斜率鉴频实验

2.15.1 实验分析

1. 掌握模拟锁相环的组成及工作原理；
2. 学习用集成锁相环构成锁相解调电路。

2.15.2 实验原理

1. 锁相环路的基本组成

完成两个信号的相位同步的自动控制系统叫做锁相环路，也就是说锁相环利用相位误差电压去消除频率误差，所以当电路达到平衡状态之后，虽然有剩余相位误差存在，但频率误差可以降低到零，从而实现无频差的频率跟踪和相位跟踪。一个最基本的锁相环路如图 2.17.1 锁相环组成方框图所示。它包括三个部件：压控振荡器（VCO），鉴相器（PD）和环路滤波器（LF）。

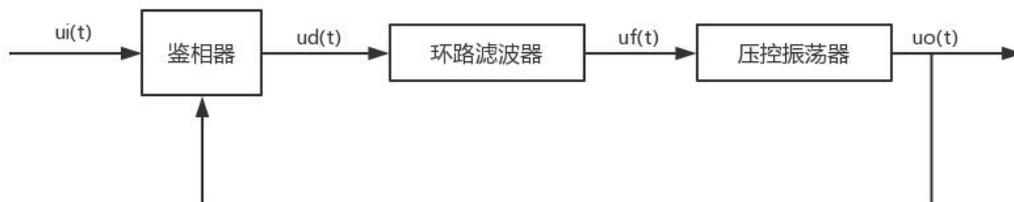


图 2.15.1 锁相环组成方框图

从图 2.17.1 锁相环组成方框图可以看到，VCO、PD 和 LF 三者组成一个闭合环路， $V_i(t)$ 为输入信号， $V_o(t)$ 为输出信号。其中，压控振荡器（VCO）受控制电压的控制，使压控振荡器输出信号频率向输入信号频率靠拢，两个信号间的相位差减小，也是一个电压/频率变换器；鉴相器（PD）是进行相位比较的装置，它把压控振荡器的

输出信号 $V_o(t)$ 与输入信号 $V_i(t)$ 之间的相位进行比较，产生对应与两信号相位差的误差电压 $V_d(t)$ ，一般 $V_o(t)$ 为直流量或低频交流量。因为鉴相器是非线性电路，因而在 $V_d(t)$ 会产生无用的组合频率分量及干扰，环路滤波器（LF）的作用就是滤除误差电压 $V_d(t)$ 中的高频分量和噪声干扰，产生一个只反映相位差大小的控制信号 $V_c(t)$ 。

2. 锁相环路的锁定、跟踪和捕捉

当两个输入信号通过环路作用后，瞬时相位差趋向一个固定的值，并一直保持下去，这这时锁相环路进入锁定状态。锁相环路锁定之后，有两个不同的自动调节过程：一是跟踪过程，二是捕捉过程。其中，跟踪过程是在环路锁定之后，若输入信号频率发生变

化，产生了瞬时频差，从而使瞬时相位差发生变化，则环路将及时调节误差电压去控制 VCO，使 VCO 输出信号频率随之变化，即产生新的控制频差，VCO 输出频率及时跟踪输入信号频率。当控制频差等于固有频差时，瞬时频差再次为零，继续维持锁定，完成跟踪过程。在锁定后能够继续维持锁定所允许的最大固有角频差的两倍称为跟踪带；捕捉过程是环路由失锁状态进入锁定状态。

3. 集成锁相环 NE564 简介

NE564 是一种工作最高工作频率为 50MHz 的超高频集成锁相环，其内部结构、引脚分布和内部电路如图 2.17.2 和图 2.17.3。

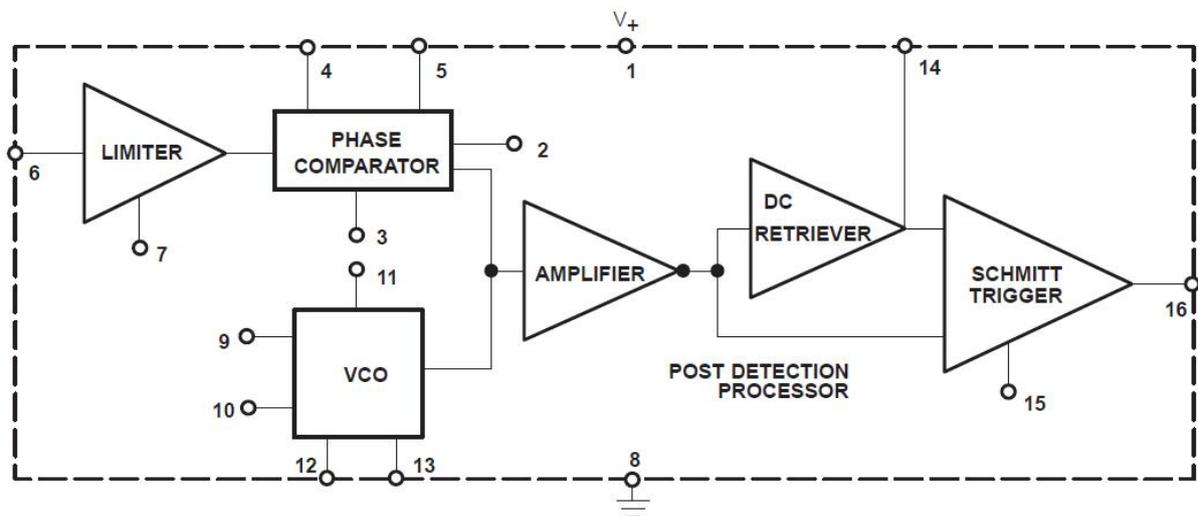


图 2.15.2 NE564 内部结构图

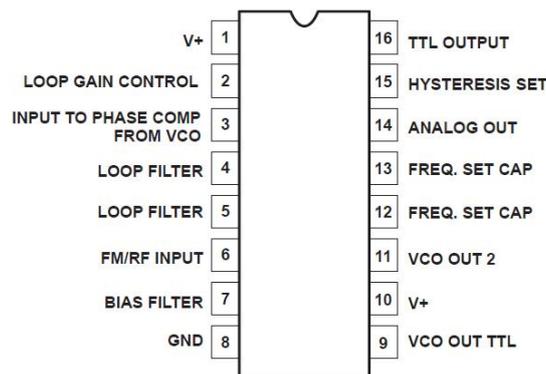


图 2.15.3 NE564 管脚分布图

NE564 的主要参数如下：最高工作频率 50MHz，最大锁定范围 $\pm 12\% f_0$ ，输入阻抗 $> 50K\Omega$ ，电源工作电压 5~12V，典型工作电压为 5V，典型工作电流为 60mA，最大允许功耗为 40mW。在频偏为 $\pm 10\%$ ，中心频率为 5MHz 时，解调输出电压为 $140mV_{p-p}$ ，输入信号的有效值 $\geq 200mV_{rms}$ 。

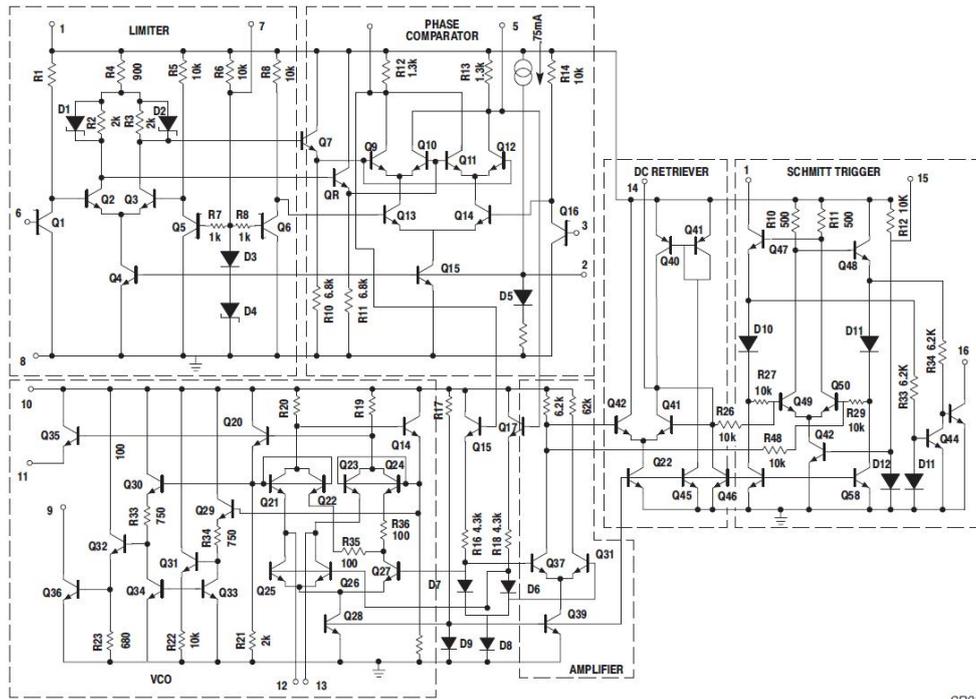


图 2.15.4 锁相环内部电路图

2. 由 NE564 组成的锁相环解调器

由 NE564 组成的锁相环解调器见实验箱的锁相环解调电路。在锁相解调电路中，信号从第 6 脚经交流耦合输入，2 脚作为压控振荡器增益控制端，12 脚和 13 脚外接定时电容，使振荡在 10.7MHz 上，从 14 脚输出调制信号经运算放大器 LM358 放大后输出。

本实验使用的电路模块的原理图如图 2.17.5 所示，

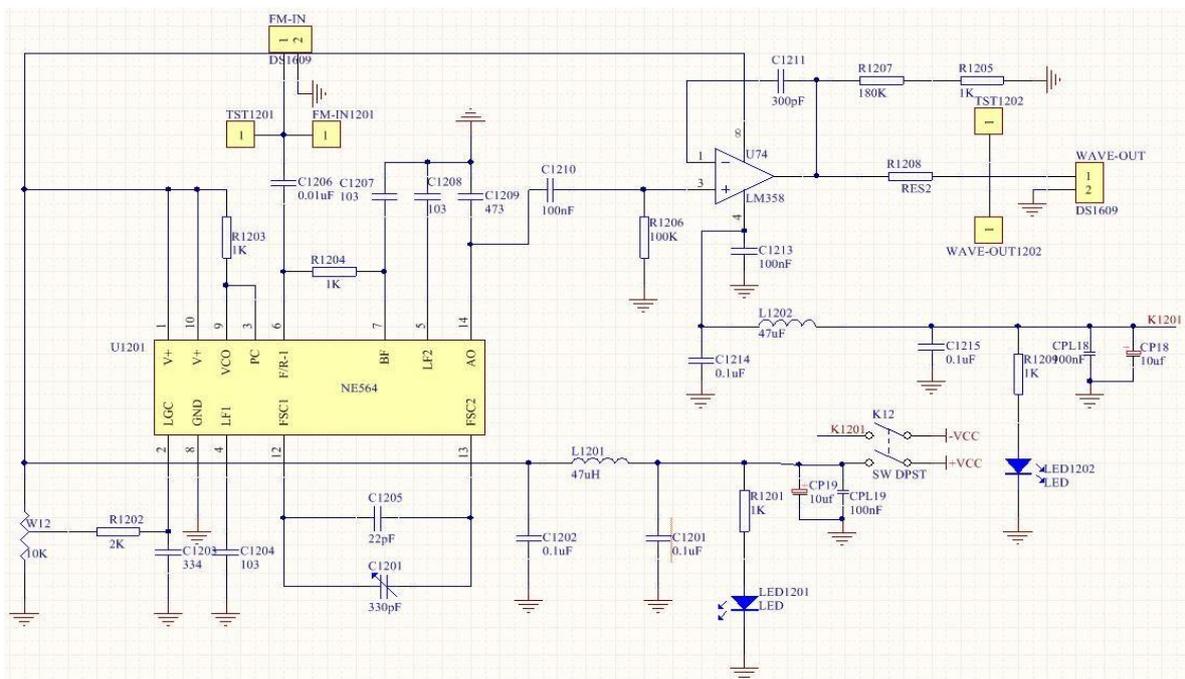


图 2.15.5 锁相环解调电路原理图

2.15.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2.15.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、变容二极管调频电路单元、高频功率放大电路、锁相解调电路。

2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关及各个模块开关，相应 LED 点亮。



图 2.15.6 锁相解调实验接线

3. 从 FM-IN 处输入 10.7MHz 的调频信号(具体连线如下：由低频函数发生器的 T21 输出 1kHz 左右的调制信号连线到变容二极管调频电路单元的 WAVE-IN 进行调频后由 FM-OUT 输出再连线至高频功率放大电路的 FM-IN 进行放大，再将 TX 输出经放大后的调频信号连线到锁相解调电路的 FM-IN)，仔细调节 W12，在 WAVE-OUT 处观察输出波形，若解调出的信号不好请检查相关单元的拨码：低频函数发生器：SW201：“10”，变容二极管调频单元：SW1：“1010”，高频功放单元：SW101：“100”，若解调的

信号还不好，请仔细调节变容二极管调频单元的 L102，使 FM-OUT 输出的调频信号在 10.7MHz 左右；

4. 观察调制信号频率大小，与调制频偏大小对输出信号的影响。

2. 15.5 实验扩展

1. 整理数据，画出波形图；
2. 根据波形图说出调制信号频率，调制频偏与输出信号大小的关系。



2.16 二次变频与鉴频电路实验

2.16.1 实验分析

1. 掌握集成电路 MC3361 的基本电路原理、功能和方法；
2. 掌握集成电路 MC3361 用于二次变频和频率解调的方法。

2.16.2 实验原理

集成电路 MC3361 是一个内含振荡器、混频器、相移、限幅器、鉴频器、滤波器、噪声抑制和射频放大器多项功能的专用集成电路，主要用于完成二次变频和鉴频，广泛用于通信机中完成窄带调频信号的接收功能。其内部功能框图如图 2.16.1 所示。

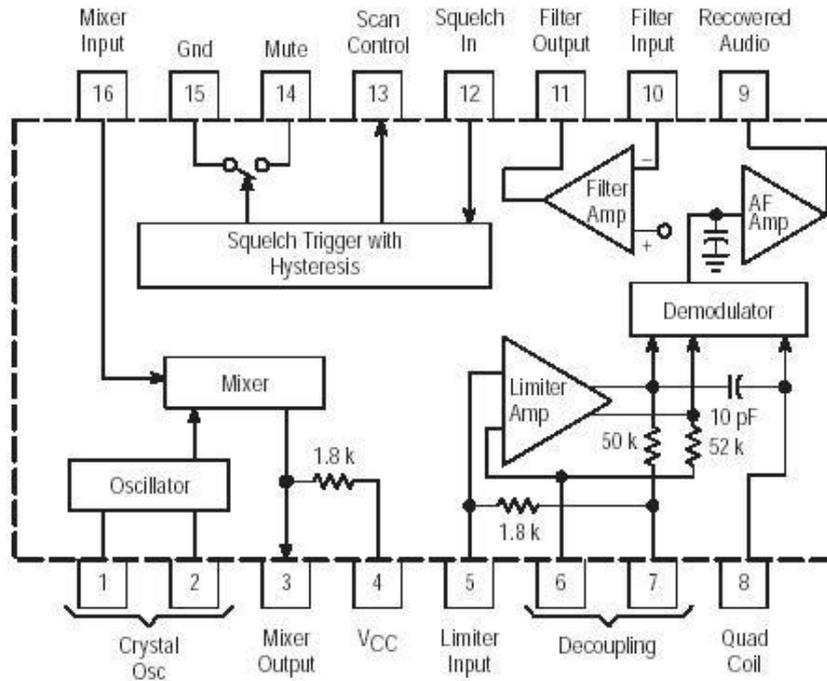


图 2.16.1 MC3361 内部功能框图

其中，1、2 引脚接晶体振荡器，3 脚为混频器输出端，4 脚是正电源端，5 脚是限幅器输入端，6、7 脚去耦，8 脚为积分器输入端，x9 脚为解调器输出端，10 脚为滤波器输入端，11 脚为滤波器输出端，12 脚为噪声抑制输入端，13 脚为扫描控制端，14 脚为静噪开关，15 脚为地，16 脚为射频输入端。

MC3361 工作在+5V 电压下，输入信号频率为 10.7MHz，内部振荡信号为 10.245MHz。通过内部混频电路差频出 455kHz 信号由 3 脚

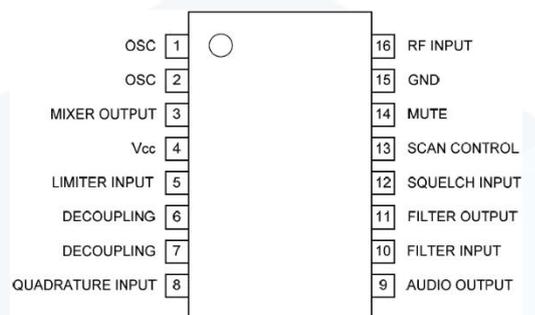


图 2.4.2 MC3361 芯片引脚分布

输出,经陶瓷滤波器(455kHz)送内部限幅器、鉴频器、滤波器和放大器,最后从9脚输出解调信号。采用MC3361实现二次变频和鉴频电路如图2.16.2所示,采用的是乘积型相位鉴频器,其中的相移网络部分由MC3361的8脚外接LC电路完成。

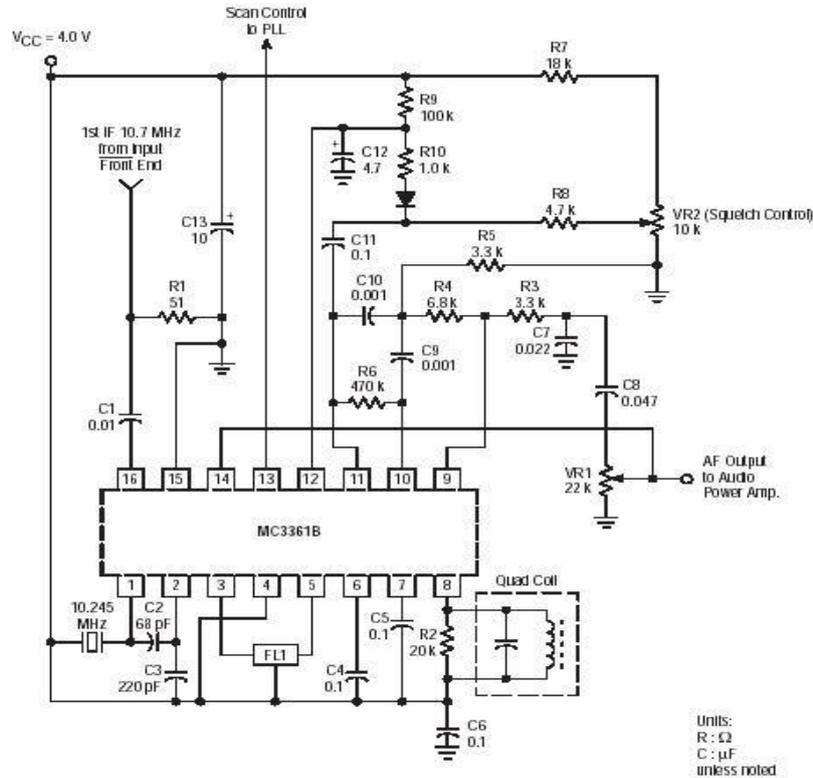


图 2.16.2 二次变频和鉴频电路

本实验使用的模块电路的原理图如图2.16.3所示,

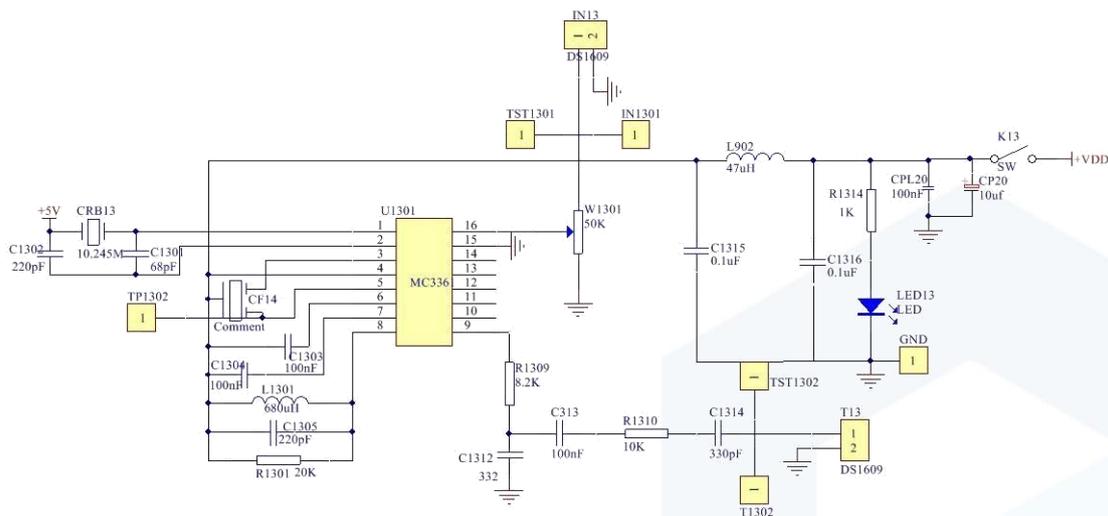


图 2.16.3 鉴频电路原理图

2.16.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）；



2.16.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、变容二极管调频电路、高频功率放大电路、小信号调谐放大、鉴频电路。

2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关，打开相应模块的电源开关，相应的 LED 点亮。

3. 实验接线（各模块连接总体预览如图 2.16.4 所示）

(1) 用导线连接低频函数发生器模块的 T21 和变容二极管调频电路模块的 WAVE-IN，由低频函数发生器模块产生低频信号并从 T21 处输出；

(2) 用导线连接变容二极管调频电路模块的 FM-OUT 和高频功率放大电路模块的 FM-IN，由变容二极管调频电路模块产生载波频率为 10.7MHz 的调频信号；

(3) 高频功率放大电路模块的 TX 和小信号调谐放大模块的 RX 用两根线绞在一起做天线，用以模拟天线感应信号；

(4) 用导线连接小信号调谐放大模块的 T31 和鉴频电路模块的 IN13，调整鉴频电路模块中变压器 L1301 的磁芯，用示波器分别观察 T13 处的波形和频率。

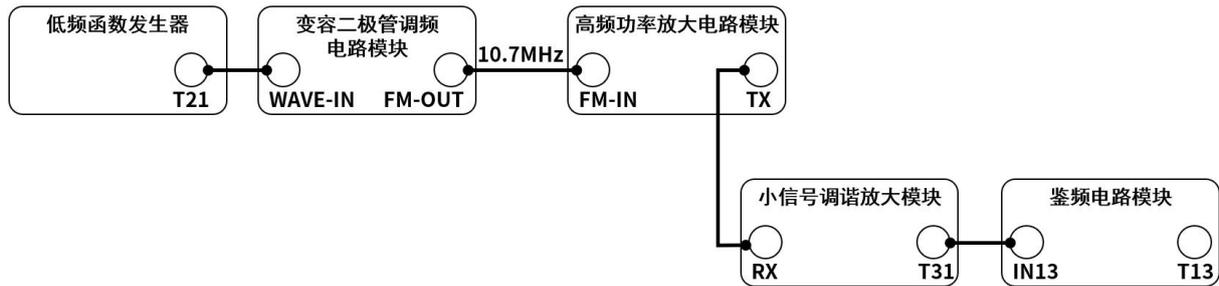


图 2.16.4 各模块连接示意图

4. 改变输入信号频率, 观察输出波形变化并进行分析(若在鉴频电路模块的 T13 处输出的解调信号与低频函数发生器的 T21 处的调制信号不同频率, 就要仔细调节整个信道的中心频率)

步骤如下:

(1) 观测变容二极管调频电路模块的 FM-OUT 输出, 若不在 10.7MHz 附近就要调节中周即该模块的变压器 L102, 同时还要调节变容二极管调频电路的电位器 W103 和高频功率放大电路模块的电位器 W1001 使高频功率放大电路模块的 TX 处的调频波不失真(若自激也是调节这两个电位器, 关闭高频功率放大电路单元电源后再打开等办法来消除自激现象);

(2) 调频信号在高频功率放大电路模块的 FM-IN 输入经高频功放后在 TX 处一般可测得峰峰值达 8V 的调频波;

(3) 经天线耦合后适当调节小信号调谐放大模块的电位器 W301 和变压器 TR301, 在 T31 处可测得约 1V 左右的调频信号, 输入到 IN13 经鉴频电路解调后(适当调节 W1301)可在 T13 处得到约 0.1V~0.2V 的解调信号)。

2.16.5 实验扩展

1. 整理实验数据, 通过波形分析二次变频的作用;
2. 通过调试, 分析 MC3361 使用中应注意的问题及解决方法。

2.17 锁相环鉴频实验

2.17.1 实验分析

1. 掌握模拟锁相环的组成及工作原理；
2. 学习用集成锁相环构成锁相解调电路。

2.17.2 实验原理

1. 锁相环路的基本组成

完成两个信号的相位同步的自动控制系统叫做锁相环路，也就是说锁相环利用相位误差电压去消除频率误差，所以当电路达到平衡状态之后，虽然有剩余相位误差存在，但频率误差可以降低到零，从而实现无频差的频率跟踪和相位跟踪。一个最基本的锁相环路如图 2.17.1 锁相环组成方框图所示。它包括三个部件：压控振荡器（VCO），鉴相器（PD）和环路滤波器（LF）。

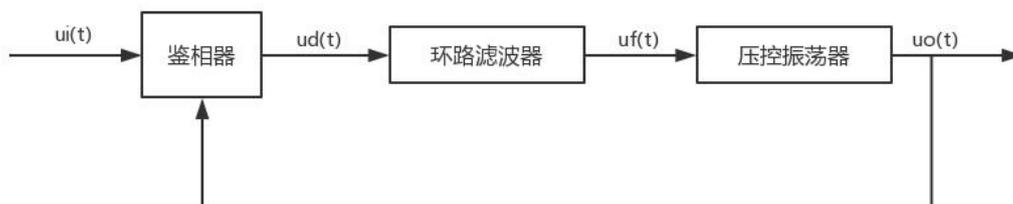


图 2.17.1 锁相环组成方框图

从图 2.17.1 锁相环组成方框图可以看到，VCO、PD 和 LF 三者组成一个闭合环路， $V_i(t)$ 为输入信号， $V_o(t)$ 为输出信号。其中，压控振荡器（VCO）受控制电压的控制，使压控振荡器输出信号频率向输入信号频率靠拢，两个信号间的相位差减小，也是一个电压/频率变换器；鉴相器（PD）是进行相位比较的装置，它把压控振荡器的

输出信号 $V_o(t)$ 与输入信号 $V_i(t)$ 之间的相位进行比较，产生对应与两信号相位差的误差电压 $V_d(t)$ ，一般 $V_d(t)$ 为直流量或低频交流量。因为鉴相器是非线性电路，因而在 $V_d(t)$ 会产生无用的组合频率分量及干扰，环路滤波器（LF）的作用就是滤除误差电压 $V_d(t)$ 中的高频分量和噪声干扰，产生一个只反映相位差大小的控制信号 $V_c(t)$ 。

2. 锁相环路的锁定、跟踪和捕捉

当两个输入信号通过环路作用后，瞬时相位差趋向一个固定的值，并一直保持下去，这时锁相环路进入锁定状态。锁相环路锁定之后，有两个不同的自动调节过程：一是跟踪过程，二是捕捉过程。其中，跟踪过程是在环路锁定之后，若输入信号频率发生变

化，产生了瞬时频差，从而使瞬时相位差发生变化，则环路将及时调节误差电压去控制 VCO，使 VCO 输出信号频率随之变化，即产生新的控制频差，VCO 输出频率及时跟踪输入信号频率。当控制频差等于固有频差时，瞬时频差再次为零，继续维持锁定，完成跟踪过程。在锁定后能够继续维持锁定所允许的最大固有角频差的两倍称为跟踪带；捕捉过程是环路由失锁状态进入锁定状态。

3. 集成锁相环 NE564 简介

NE564 是一种工作最高工作频率为 50MHz 的超高频集成锁相环，其内部结构、引脚分布和内部电路如图 2.17.2 和图 2.17.3。

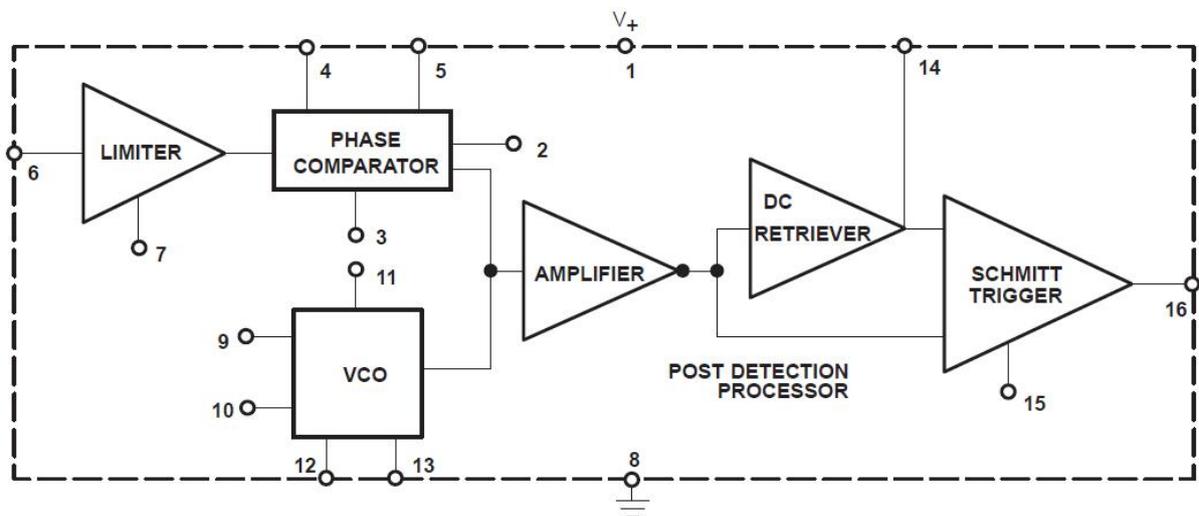


图 2.17.2 NE564 内部结构图

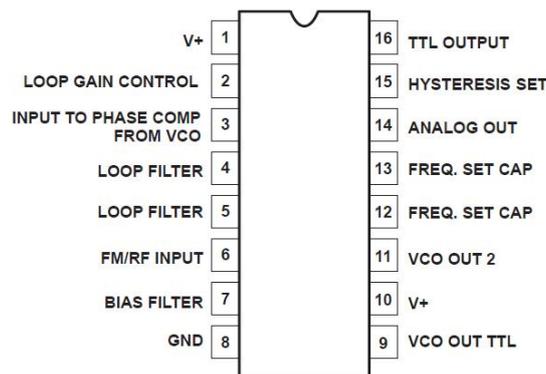


图 2.17.3 NE564 管脚分布图

NE564 的主要参数如下：最高工作频率 50MHz，最大锁定范围 $\pm 12\% f_0$ ，输入阻抗 $> 50K\Omega$ ，电源工作电压 5~12V，典型工作电压为 5V，典型工作电流为 60mA，最大允许功耗为 40mW。在频偏为 $\pm 10\%$ ，中心频率为 5MHz 时，解调输出电压为 $140mV_{p-p}$ ，输入信号的有效值 $\geq 200mV_{rms}$ 。

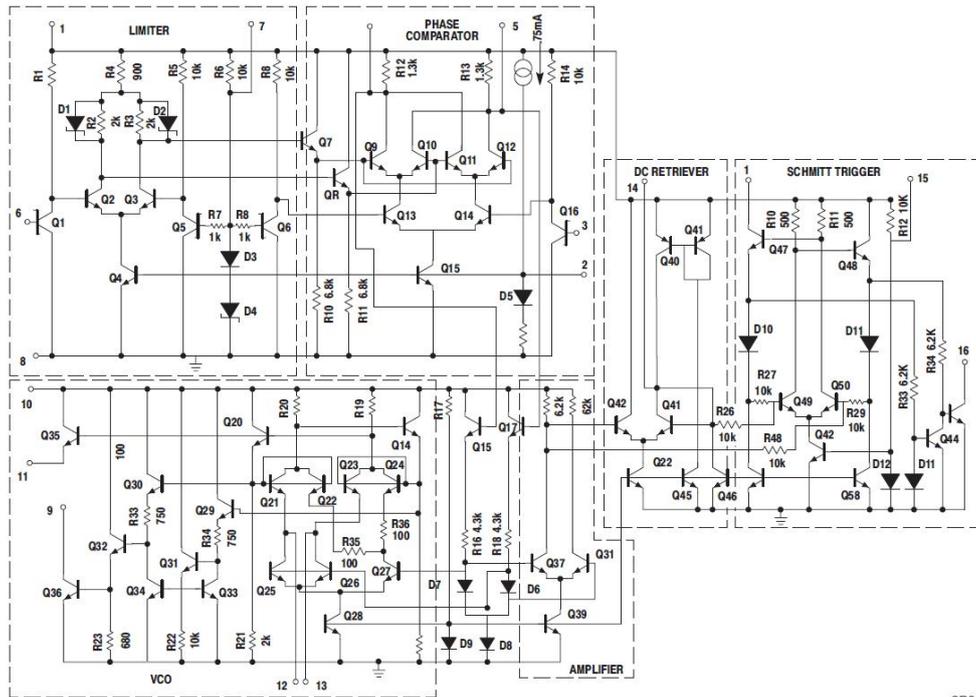


图 2.17.4 锁相环内部电路图

2. 由 NE564 组成的锁相环解调器

由 NE564 组成的锁相环解调器见实验箱的锁相环解调电路。在锁相解调电路中，信号从第 6 脚经交流耦合输入，2 脚作为压控振荡器增益控制端，12 脚和 13 脚外接定时电容，使振荡在 10.7MHz 上，从 14 脚输出调制信号经运算放大器 LM358 放大后输出。

本实验使用的电路模块的原理图如图 2.17.5 所示，

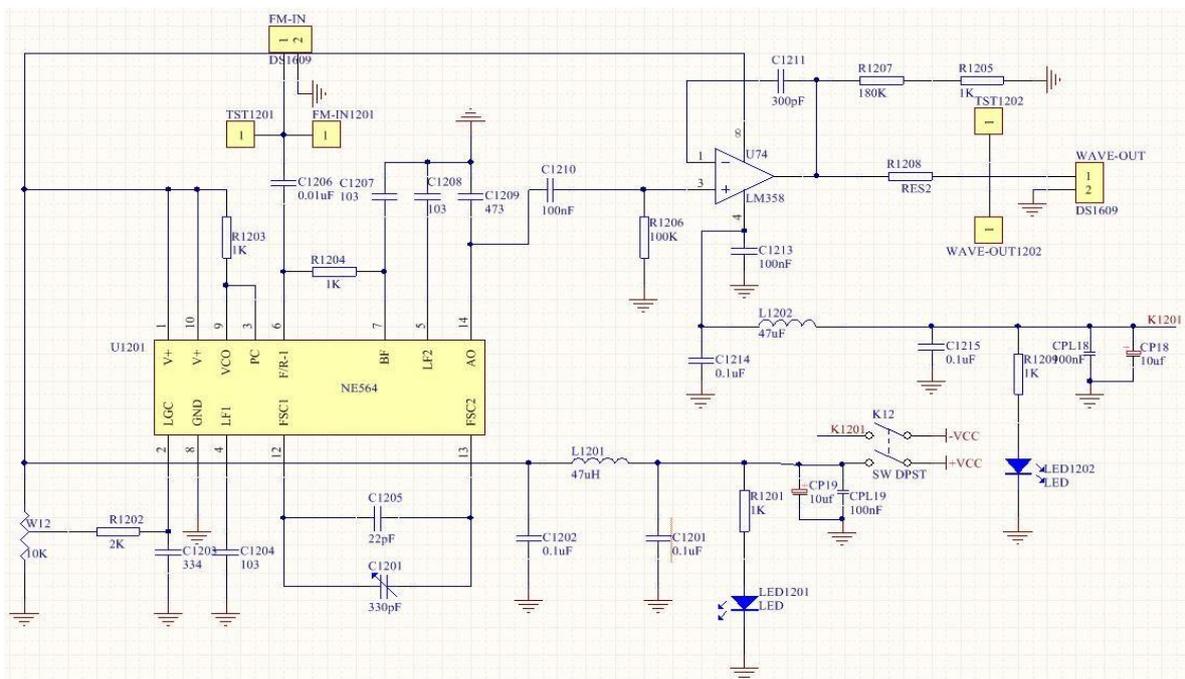


图 2.17.5 锁相环解调电路原理图

2.17.3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2.17.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、变容二极管调频电路单元、高频功率放大电路、锁相环解调电路。

2. 接通 220V 电源，打开实验箱开关及各个模块开关，相应 LED 点亮。



图 2.17.6 锁相环解调实验接线

3. 从 FM-IN 处输入 10.7MHz 的调频信号(具体连线如下：由低频函数发生器的 T21 输出 1kHz 左右的调制信号连线到变容二极管调频电路单元的 WAVE-IN 进行调频后由 FM-OUT 输出再连线至高频功率放大电路的 FM-IN 进行放大，再将 TX 输出经放大后的调频信号连线到锁相环解调电路的 FM-IN)，仔细调节 W12，在 WAVE-OUT 处观察输出波形，若解调出的信号不好请检查相关单元的拨码：低频函数发生器：SW201：“10”，变容二极管调频单元：SW1：“1010”，高频功放单元：SW101：“100”，若解调的

信号还不好，请仔细调节变容二极管调频单元的 L102，使 FM-OUT 输出的调频信号在 10.7MHz 左右；

4. 观察调制信号频率大小，与调制频偏大小对输出信号的影响。

2.17.5 实验扩展

1. 整理数据，画出波形图；
2. 根据波形图说出调制信号频率，调制频偏与输出信号大小的关系。



2.18 锁相环倍频实验

2.18.1 实验分析

1. 掌握模拟锁相环的组成及工作原理；
2. 学习用集成锁相环构成锁相倍频电路的原理和方法。

2.18.2 实验原理

本实验电路采用 NE564 和 74LS393 组成锁相倍频电路，见实验箱的 PLL 频率合成器电路。其中，74LS393 为分频器，它由两个完全相同单元组成，分别可以进行 2 分频，4 分频，8 分频，16 分频，如果将 16 分频输出与时钟输入端相接则可以组成 32 分频，64 分频，128 分频，256 分频。

实验电路工作原理如下：NE564 的 VCO 振荡输出信号（从 9 脚输出）经电位器 W402 与分压电阻 R406 分压后，输入到 74LS393 的 1 脚，分频后的信号输入到 NE5643 脚，简单的框图如图 2.18.1：

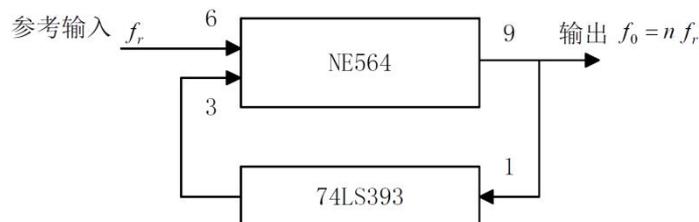


图 2.18.1 锁相倍频框图

由 NE564 的 3 脚输入的分频信号与从 NE564 的 6 脚输入的参考信号进行鉴频，输出误差电压控制 VCO，最终使 VCO 输出 $f_0 = n f_r$ 的频率，达到倍频目的。在锁相分频电路中，NE564 的 2 脚为增益控制端调节 W401 可改变同步带大小。NE564 的 12—13 脚跨接定时电容 C，不同的电容 C 和不同的输入频率相配合，可以实现不同的倍频。C 的值一般根据下面的近似公式计算：

$$f_0 \approx \frac{1}{16RC} \quad (\text{或} \quad C = \frac{1}{16Rf_0})$$

若取 $R=100\ \Omega$ ，则有：

$f_0 = 800\text{kHz}$ 时	$C \approx 780\text{pF}$ (16 倍频)
$f_0 = 1.6\text{MHz}$ 时	$C \approx 390\text{pF}$ (32 倍频)
$f_0 = 3.2\text{MHz}$ 时	$C \approx 195\text{pF}$ (64 倍频)
$f_0 = 6.4\text{MHz}$ 时	$C \approx 100\text{pF}$ (128 倍频)

2.18.4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、PLL 频率合成电路。
2. 将低频函数发生器单元的 SW201 置为：“01”，仔细调节 W201 和 W206 以便在 T21 处得到不失真的 50kHz±100Hz、0.5V 的正弦波。
3. 连接 T21 到 PLL 频率合成电路单元的 WAVE-IN。

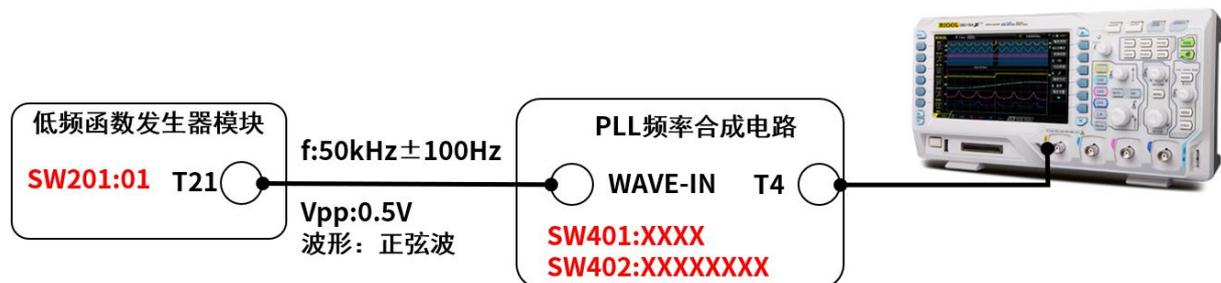


图 2.18.3 锁相环倍频实验接线

4. 将 PLL 频率合成电路模块的 SW401 和 SW402 分别置为以下状态，在 T4 处观测倍频后的频率：

表 2.18.1 PLL 频率合成电路模块拨码配置频率对照表

SW401	SW402	倍频后的频率
1000	11100000	800 kHz
0100	01110000	1.6MHz
0010	00111000	3.2MHz
0001	00011100	6.4MHz

5. 将锁相倍频电路连接 16 倍频电路，观察锁相环的同步、失锁和再同步过程。步骤如下：

(1) 先使输出信号锁定在 800kHz。用双踪示波器的探头分别测试输入信号（在 WAVE-IN 处）和分频后的信号（在 T401 处），示波器上同时显示两处的波形，T4 处的波形为方波；

(2) 改变输入信号频率

1) 增大输入信号 f_R 频率，观察示波器上的两个波形。开始时，两个波形同步移动，此时处在同步跟踪状态。当 f_R 增加到一定值时，只有输入信号 f_R 在移动，此时，处于失锁状态，记下此时的 f_R 值；

2) 减小 f_R 直至进入锁定状态（两波同步移动），调节 W402。再增大 f_R 值直到失锁，

记下 f_R 值, 比较两次的 f_R 值:

3) 重复步骤 2, 找到最大的 f_R 值, 即此 NE564 的同步带。

注: 如 256 倍频的输出频率偏离 6.4MHz, 可适当拨 SW402 的 7、8 两位, 并调节 CC401。

2.18.5 实验扩展

1. 分别计算 16 分频, 32 分频, 64 分频, 128 分频的实际定时电容 C 的值。
2. 计算所测到的最大同步带值。



2.19 小功率调频发射机电路实验

2.19.1 实验分析

1. 掌握调频发射机电路的设计与调试方法, 以及调试中常见故障的分析与处理。
2. 学习将各种单元电路组合起来完成工程实际要求的整机电路设计的方法。

2.19.2 实验原理

1. 调频发射机的主要技术指标

主要核心指标有以下几点:

(1) 发射功率 (P_A)

发射功率就是发射机输送到天线上的功率。为了使天线有效地把载波发射出去, 必须让天线的长度近似等于发射机高频振荡的波长 λ , 波长 λ 与频率 f 的关系为 $\lambda = \frac{c}{f}$ ($c = 3 \times 10^8 m/s$)。在接收机的灵敏度 $U_A = 2\mu V$ 时, 通信距离 s 与发射功率 P_A 可以通过近似公式 $S_{KM} = 1.07 \times \sqrt[4]{\{P_A\}_{mW}}$ 计算;

(2) 工作频率:

发射机的工作频率应根据调制方式, 在国家或有关部门所规定的范围内选取;

(3) 总效率:

发射机发射的总功率 P_A 与其消耗的总功率 P'_C 之比称为发射机的总效率:

$$\mu_A = \frac{P_A}{P'_C}$$

(4) 非线性失真:

当最大频偏 $\Delta f_m = 75kHz$, 调制信号的频率为 $100 \sim 7.5kHz$ 时, 要求调频发射机的非线性失真系数 r 应小于 1%;

(5) 杂音电平:

调频发射机的寄生调幅应小于载波电平的 5%~10%, 杂音电平应小于 -65dB。

2. 调频发射机的组成框图

本实验主要目的是验证调频发射机工作原理, 因此, 整机电路比较简单。调频发射机组成框图如图 2.19.1 所示。

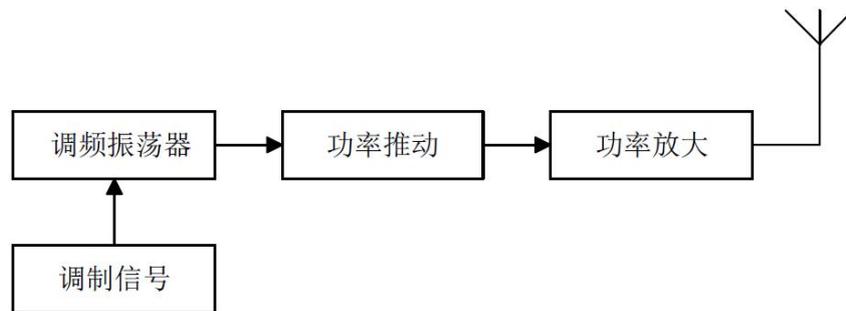


图 2.19.1 调频发射机组成框图

工作原理：首先由变容二极管线性调频电路产生中心频率为 $f_0 = 10.7\text{MHz}$ 的调频信号，最大频偏 $\Delta f_m = 20\text{KHz}$ ，整个发射机的频率稳定度由该级决定；然后经过缓冲隔离级将振荡级与功放级隔离，以减小功放级对振荡级的影响；调频信号经过功率激励级和丙类功率放大器放大后的调频信号经过发射天线发射出去。

2. 19. 3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2. 19. 4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、变容二极管调频电路单元、高频功率放大电路。
2. 将低频函数发生器的拨码状态置为：SW201：“10”，调节 W201 和 W206 在 T21 输出 1kHz 左右的不失真的调制信号。
3. 由低频函数发生器的 T21 连线到变容二极管调频电路单元的 WAVE-IN 进行调频，此时将变容二极管调频电路单元的拨码 SW1 的状态设置为“1010”。
4. 变容二极管调频电路单元的调频信号由 FM-OUT 输出再连线至高频功率放大电路

的 FM-IN 进行放大。

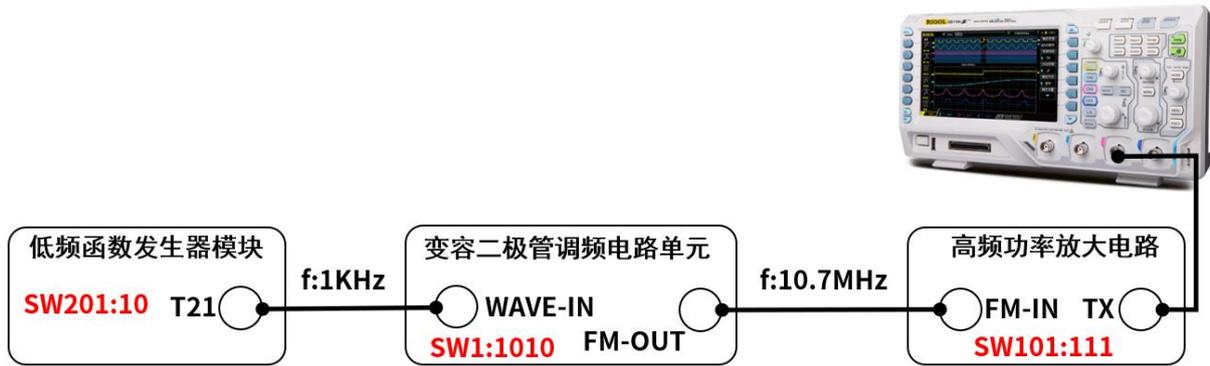


图 2.19.2 小功率调频发射机电路实验接线

5. 将高频功率放大电路的拨码 SW101 的状态置为：“111”，可用示波器测三极管 Q1001，Q1002 的工作状态和 TX 处的调频信号幅度。如果发射信号的中心频率有偏移，可以微调 L102 使之成为 10.7MHz。

2.19.5 实验扩展

1. 一般来说振荡电路后都会加缓冲隔离级，而当它们级联时，会出现波形幅度明显减小或波形失真，这是什么原因如何解决？
2. 当后级功放对前级主振级造成影响时，从哪些方面去减小影响？

2.20 调频接收机电路实验

2.20.1 实验分析

1. 掌握调频接收机电路的构成与调试方法;
2. 了解集成电路单片接收机 MC3361 的性能及应用。

2.20.2 实验原理

1. 调频接收机的主要技术指标

调频接收机的主要技术指标有:

- 工作频率范围: 就是接收机可以接收到的无线电波的频率范围;
- 接收灵敏度: 就是接收机接收微弱信号的能力。通常用输入信号电压的大小来表示, 接收的输入信号越小, 灵敏度越高;
- 选择性: 接收机从各种信号和干扰中选出所需信号的能力称为选择性, 单位用 dB 表示;
- 频率特性: 接收机的频率响应范围称为频率特性;
- 输出功率: 接收机的负载输出的最大不失真功率称为输出功率。

2. 调频接收机组成

(1) 调频接收机的工作原理

一般调频接收机的组成框图如图 2.20.1 所示。

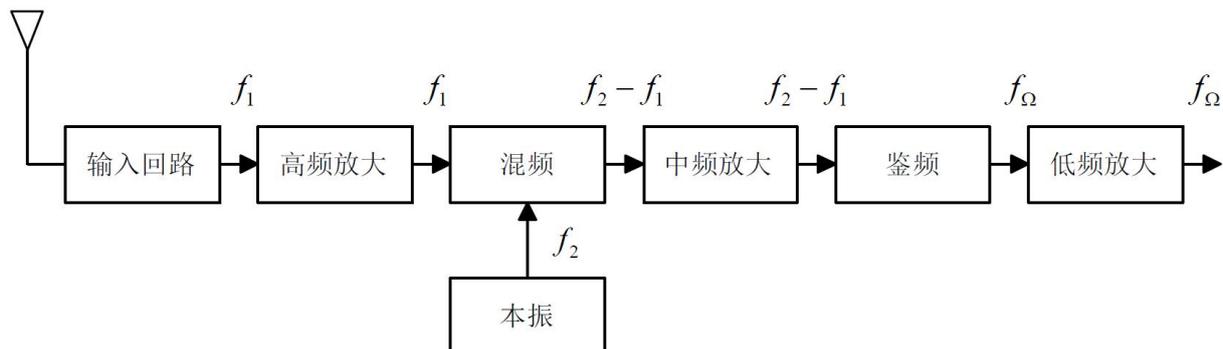


图 2.20.1 调频接收机组成框图

天线接收到的高频信号, 经输入调谐回路将所需的频率 f_1 选择出来, 再经高频放大级放大进入混频级。本振输出的 f_2 与 f_1 进行混频, 输出两个频率的和频和差频信号。中频放大电路通过调谐回路选出中频信号 $f_2 - f_1$, 然后经鉴频器解调出低频调制信号送低频功放放大器。

由于天线接收到的高频信号经过混频成为固定的中频，再加以放大，因此接收机的灵敏度较高，选择性较好，性能也比较稳定。本实验电原理图中（见小信号调谐放大及鉴频电路），晶体管 Q1 及其外围元件组成输入回路及高放回路，集成电路 MC3361 实现中频放大、混频、鉴频、低频功放。具体的工作原理如下：

从天线接收到的高频信号经 C301、CC301、L301 组成的选频回路，选取信号为 $f_s = 10.7\text{MHz}$ 的调频信号，经晶体管 Q1 进行放大，由 CC302、TR301 初级组成的调谐回路，进一步滤除无用信号，将有用信号经变压器和 W1301 衰减后进入 MC3361 的 16 脚，并与 10.245 MHz 本振信号进行混频（MC3361 的 1、2 脚外挂 10.245 MHz 晶体及微调电容与内部振荡单元产生的），产生差频信号从 3 脚输出，经 455kHz 陶瓷滤波器滤波后又从 5 脚又进入 MC3361 进行放大，MC3361 的 8 脚外挂鉴频电路，最终从 9 脚输出调制信号 f_Ω 。

2. 20. 3 实验仪器

为保障本次实验顺利开展，需提前准备好：高频电路实验系统、示波器和一套调试工具（除高频电路实验系统设备以外，其它工具可结合实际情况配合实验使用）。



2. 20. 4 实验步骤

1. 实验模块：低频函数发生器、变容二极管调频电路单元、高频功率放大电路、鉴频电路、小信号调谐放大。
2. 分别调试好低频函数发生器电路、变容二极管调频电路、高频功率放大电路（保持小功率调频发射机电路实验（2.192.19.4）中的连线不变）；用导线连接小信号调谐放大的 T31 和鉴频电路的 IN13。



图 2.20.2 调频接收机电路实验-发射机接线

3. 用两根导线做成双绞线作为天线，将发射单元天线和接收单元天线连好即可，即一根导线接在高频功率放大电路的 TX 孔中，一根导线接在小信号调谐放大的 RX 孔中。（温馨提示：TX 与 RX 是两根独立的导线，不直接连接，通过双绞的方式靠近）

4. 从变容二极管调频电路的 WAVE-IN 处加入 1kHz 左右的调制信号，则从鉴频电路的 T13 处用示波器可观测到输出的解调波。

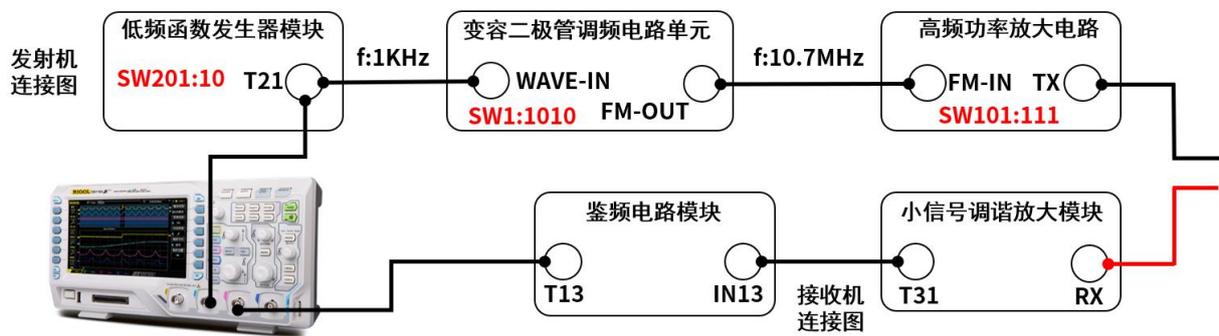


图 2.20.3 调频接收机电路实验整机调试接线图

5. 当从鉴频电路的 T13 处观察鉴频输出信号，此时如果波形失真可以微调变容二极管调频电路的变压器 L102、小信号调谐放大的变压器 TR301 和鉴频电路的变压器 L1301 和电位器 W1301。

注意观察鉴频信号频率与调制信号频率是否一致，幅度大小与调制频偏的关系（调制频率可以通过改变调制信号大小来改变）。如果 T13 处的信号失真，一般要考虑是否调制信号幅度过大以及变容二极管调频产生的调频信号的中心频率偏离 10.7MHz 太远。

2.20.5 实验扩展

1. 分别画出调制信号与鉴频信号的波形，整理好实验所测得的数据并绘制成表格；
2. 总结调试过程中所遇到的问题及解决的方法；
3. 思考调幅无线通信系统应如何构成？本实验箱能否构成？为什么？

第3章 附录

附录 I 常用测量仪器仪表简介

注：仪器仪表种类样式繁多，应用范围广泛。

本实验指导书中仅以实验室中的常见设备及基础使用方法讲解为主

仪器使用注意事项

每一台电子仪器都有规定的操作规程的使用方法，使用者必须严格遵守。用前后及使用过程中，都应注意以下几个方面：

(一) 仪器开机前注意事项

- 1.在开机通电前，应检查仪器设备的工作电压与电源电压是否相符。
- 2.在开机通电前，应检查仪器面板上各开关、旋钮、接线柱、插孔等是否松动或滑位，如发生这些现象，应加以紧固或整位，以防止因此而扯断仪器内部连线，造成断开、短路以及接触不良等人为故障。
- 3.在开机通电时，应检查电子仪器的接“地”情况是否良好。

(二) 仪器开机时注意事项

- 1.在仪器开机通电时，应使仪器预热 5-10 分钟，待仪器稳定后再行使用；
- 2.在开机通电时，应注意检查仪器的工作情况，即眼看、耳听、鼻闻以及检查有无不正常现象。如发现仪器内部有响声、有臭味、冒烟等异常现象，应立即切断电源，再尚未查明原因之前，应禁止再次通电，以免扩大故障。
- 3.在开机通电时，如发现仪器的保险丝烧断，应更换相同容量的保险管。如第二次开机通电，又烧断保险管，应立即检查，不应第三次调换保险管通电，更不应该随便加大保险管容量，否则导致仪器内部故障扩大，造成严重损坏。

(三) 仪器使用过程中注意事项

- 1.仪器使用过程中，对于面板上各种旋钮、开关的作用及正确使用方法，必须予以了解。对旋钮、开关的扳动和调节，应缓慢稳妥，不可猛扳猛转，以免造成松动、滑位、断裂等人为故障。对于输出、输入电缆的插接，应握住套管操作，不应直接用力拉扯电缆线，以免拉断内部导线。
- 2.信号发生器输出端不应直接连到直流电压电路上，以免损坏仪器。对于功率较大的电子仪器，二次开机时间间隔要长，不应关机后马上二次开机，否则会烧断保险丝。

3.使用仪器测试时,应先连接“低电位”端(地线),然后连接“高电位”端。反之,测试完毕应先拆除“高电位”端,后拆除“低电位”端。否则,会导致仪器过负荷,甚至损坏仪表。

(四)仪器使用后注意事项

- 1.仪器使用完毕,应切断仪器电源开关。
- 2.仪器使用完毕,应整理好仪器零件,以免散失或错配而影响以后使用。
- 3.仪器使用完毕,应盖好仪器罩布,以免沾积灰尘。

一、数字万用表

(一)了解数字万用表的组成及原理。

常用万用表的结构和外形见附录 I 图 1。



附录 I 图 1 数字万用表实物图

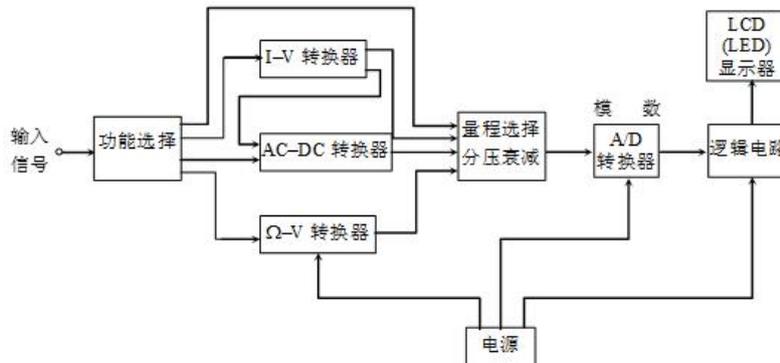
数字万用表是在直流数字电压表的基础上扩展而成的。在直流电压表的基础上,测电流时,先经过 I-V 转换器(分流电阻)将电流转换为电压(交流电流还要经 AC-DC 转换成直流电压)。测电阻时,经串联 I-V 转换器(基准电阻 R_0 和被测电阻 R_x , 后,由内部电池提供的电流通过其中产生电压 U_{R_0} 和 U_{R_x} , 则有 $\frac{U_{R_x}}{U_{R_0}} = \frac{R_x}{R_0}$, 显示值与此电压比有关,也即和被测电阻 R_x 与基准电阻 R_0 之比有关。于是可得

$$\text{显示值} = \frac{U_{R_X}}{U_{R_0}} \times 1000 = \frac{R_X}{R_0} \times 1000 \quad (1000 \text{ 是 } R_X = R_0 \text{ 时表的显示值, } R_X = 2R_0 \text{ 时满量程})$$

程)。

通过以上几种电路得到的直流电压,还要经过量程选择环节(即电阻分压器),将其转变为 0~200mV 的直流电压,再送入 A/D 转换器,将模拟量变为数字量,再经过逻辑电路的处理,经译码后,在屏上显示出十进制表示的被测量数值。

常见数字万用表多为 3 位半或 4 位半的,所谓 3 位半,即后 3 位可显示 0~9,第 1 位只能显示 0 或 1,故满码为 1999,4 位半与此类似,只是满码为 19999。显示器均为七段 LCD 或 LED 显示器。

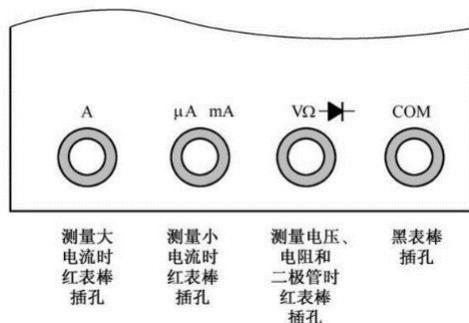


附录 I 图 2 数字万用表原理框图

(一) 表面

万用表表面印有多种符号和数值(如附录 I 图 1)。符号 A-V-Ω-F 表示这只电表是可以测量电流、电压、电阻和电容的万用表。符号“—”或“DC”表示直流,“~”或“AC”表示交流,“~”表示交流和直流共用的刻度线。刻度线下的数字是与选择开关的不同档位相对应的刻度值。

(二) 表笔和表笔插孔



附录 I 图 3 数字万用表表笔插孔图示

表笔分为红、黑二只。红表笔插入不同表笔插孔测量不同数据；黑表笔只插在 COM 孔。红表笔为正，黑表笔为负。测量时应将红色表笔插入标有“+”号的插孔，黑色表笔插入标有“-”号的插孔。

(二) 万用表的使用方法

1. 测量电阻：将旋转开关转至 Ω 档位。将黑色测试笔接入 COM 输入端，红色测试笔接入 Ω 对应输入端。使用红色和黑色测试笔的另两端测量待测电路的电阻值，读取显示值。按 Range 键可进入并切换手动量程。

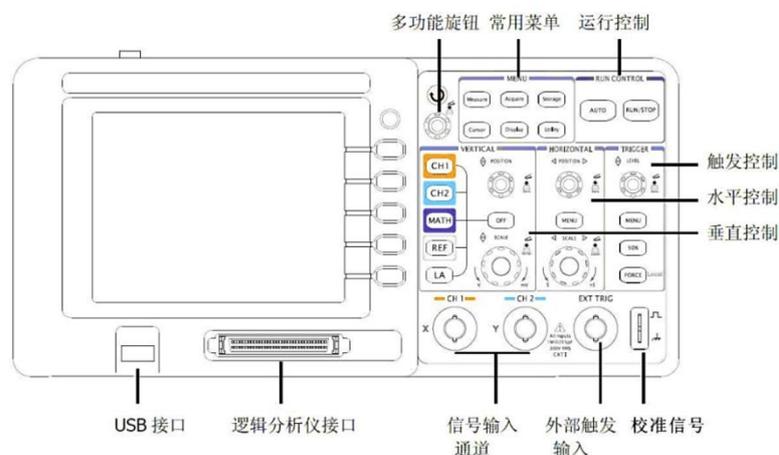
2. 测量 DC 或 AC 电压：将旋转开关转至电压档位。按 Select 键可切换交直流电压测量模式，屏幕显示“DC”直流或“AC”表示交流。将黑色测试笔插入 COM 输入端，红色测试笔插入 V 输入端。将红色和黑色测试笔另一端分别连接到被测点，读取显示值。按 Range 键可进入并切换手动量程。

3. 测试二极管：（注意：为了避免损坏万用表或被测设备,在测试二极管之前，应断开被测电路的电源，并对所有高压电容器放电）(1) 将旋转开关转至二极管测量档位。按 Select 键一次，切换至二极管测量状态。(2)将黑色测试笔接入 COM 输入端，红色测试笔接入二极管测量输入端。(3)将红色测试笔另一端连接到被测二极管的正极，将黑色测试笔另一端连接到 二极管负极。(4) 读取被测二极管的正向偏压值。如果测试笔极性接反，显示屏将显示“OL”。

二、双踪示波器

(一) 示波器组成及原理

示波器的功能区分布如附录 I 图 4 所示。



附录 I 图 4 示波器功能区分布

1. Y轴系统和X轴系统

Y轴系统有两个独立的前置放大器，其工作状态由电子开关控制。输入信号经衰减器（未画出）输入前置放大器，其输出端与示波管Y(垂直)偏转板连接。YA、YB前置放大器将被测信号的一部分送至内触发放大器，经放大后，作为“YA”或“YB”触发形式的触发信号源。外触发信号由外触发插座送入。触发信号送至触发同步电路，经整形、微分后，取其负向脉冲信号触发启动扫描发生器，以产生锯齿波。锯齿波信号经X轴放大器放大后，送至示波器X（水平）偏转板。

2. 示波管

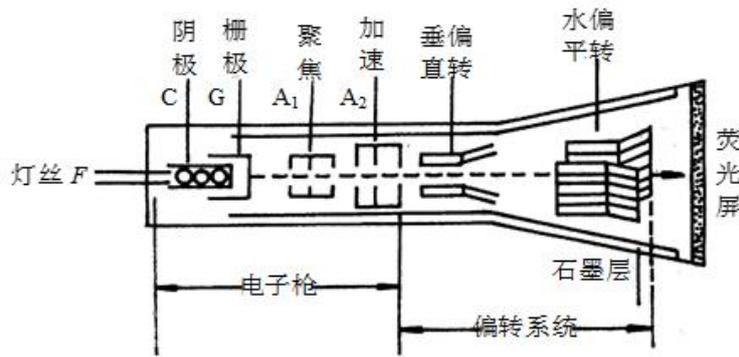


附录 I 图 5 双踪示波器原理框图

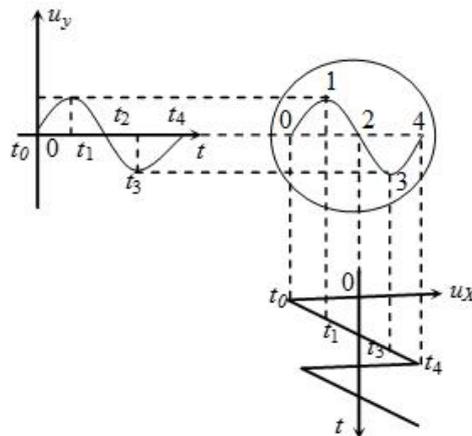
示波管是示波器的核心，由电子枪、偏转系统和荧光屏等三部分组成，其结构如附录 I 图 6 所示。电子枪包括：灯丝、阴极、栅极、聚焦、阳极和加速阳极等。其结构如附录 I 图 6 所示。当接通电源后，灯丝加热阴极，使阴极发射出一束电子束，电子束通过第一阳极与第二阳极时，受到静电场的聚焦作用，就会在荧光屏上显示出可见光点。改变栅极电压，可调节光点亮度。加速阳极是为避免调聚焦（改变 A1 电位）时，改变电子束密度从而影响亮度变化。

3. 偏转系统

由一对水平(X)偏转板和一对垂直(Y)偏转板组成。当电子束穿过偏转系统时，将同时受到 X、Y 偏转板电场的作用，按照加于偏转板上的电压信号做出相应的偏转，就能在荧光屏上绘出被测信号的波形。



附录 I 图 6 示波管结构图



附录 I 图 7 波形形成原理

在正常情况下，荧光屏上光点的相对移位是和输入到示波器 X 偏转板或 Y 偏转板上的电压成正比的。例如，若单独将一正弦信号电压 $u_y = U_m \sin t$ 送至 Y 偏转板，则在荧光屏上出现一条垂直线，若单独在 X 偏转板上加锯齿波电压 u_x ，则屏上出现一条水平线。若同时将 u_y 加在 Y 轴偏转板上，锯齿波 u_x 加在水平偏转板上，并使 u_x 与 u_y 频率相等，那么在荧光屏上就出现一个展开的正弦波。

(二) 示波器使用方法

1. 连接电路：首先，将要测量的电路连接到双踪示波器的输入端口上。
2. 设置垂直放大器：选择合适的垂直灵敏度和衰减器，并调整控制旋钮，使得信号的幅度能够在示波器屏幕上适当地显示出来。
3. 设置水平放大器：选择合适的水平扫描速度和时间基准，并调整控制旋钮，以便信号在时间轴上适当地显示出来。
4. 选择显示模式：选择适当的显示模式（如 X-Y 模式或 A-B 模式），以便能够同时显示两个信号。

5. 测量信号：根据需要，可以使用双踪示波器提供的各种测量功能，如峰值电压、频率和相位差等，来分析电路中的信号。

三、函数信号发生器

常用函数信号发生器的结构和外形如附录 I 图 8。

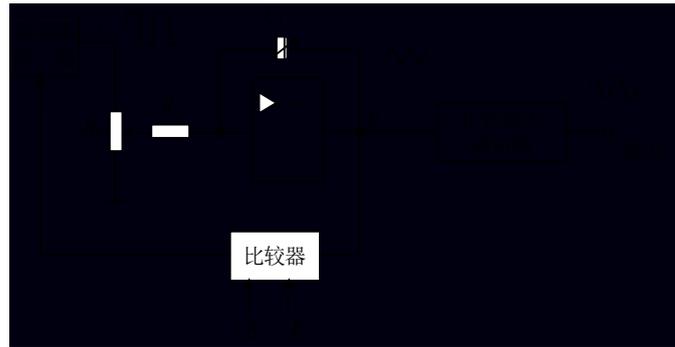


附录 I 图 8 函数信号发生器实物图

(一)函数信号发生器组成及原理

1. 函数信号发生器可以产生幅值、频率均可变的方波、三角波、正弦波等多种函数信号。

2. 函数信号发生器的基本原理框图如附录 I 图 9 所示。当该仪器电源刚合上时，设积分电容 C_1 上的电荷为零，而多谐振荡器的“a”点电位为 $-E$ 伏。积分器输出端“b”点电位向正值方向增加，当“b”点电位增加到参考电压 $+E_r$ 伏时，电压比较器工作产生一个触发信号使多谐振荡器翻转。同时“a”点电位变为 $+E$ 伏，因而积分器输出端“b”点电位开始下降，当电位下降到参考电压 $-E_r$ 时，电压比较器工作，又产生一个触发信号，使多谐振荡器回到初始状态。周而复始，电路如此产生振荡。振荡器振荡频率由“a”点电位、积分电阻 R_1 、积分电容 C_1 和电压比较器的参考电压来决定。 R_1 和 C_1 用来确定频率范围，调节 R_{p1} 可实现频率的连续可调，电压比较器电压 $\pm E_r$ 固定不变。



附录 I 图 9 函数信号发生器基本原理框图

(二)函数信号发生器的按键功能

1. “触发源方式”开关（SOURCEMODE）：通常为内触发。
2. “内触发源方式”开关（INTTRIG）：通常置于所用通道位置。当用于双路显示时，为比较两个波形的相对位置，可将其置于交替（VERTMODE）位置。
3. （扫描）触发方式：通常置于自动位置。
4. 显示方式：根据需要可置于 CH1、CH2、ALT（交替显示两路高频信号）CHOP（断续显示两路低频信号）、ADD（显示两路信号之和）。
5. 扫描灵敏度开关：表示横轴方向一个大格的时间。根据被测信号周期确定。
6. 幅度灵敏度开关：表示纵轴方向一个大格的电压。根据被测信号幅度确定。
7. 在测量波形的周期和幅值时，应注意将扫描微调旋钮和垂直（Y 轴）微调旋钮置于校准位置。
8. 当输入波形左右移动、不稳定时，可调节触发电平旋钮使波形稳定。

(三)信号发生器的使用方法

1. 打开电源开关，指示灯亮，数码管显示频率大小。
2. 根据使用频率范围，调节“频率调节”旋，调至所需的频率，此时数码管显示频率大小，指示灯指示输出频率的单位。
3. 输出电压调节：输出电压 1--5V 时，只需将“输出衰减”置 0dB 位，可以直接从电压表上读出输出电压大小，为精确读数，一般用示波器或交流毫伏表测量输出电压。当输出电压小于 1V 时，先选择适当的电压衰减，再调节“输出幅度”，直接外接示波器或交流毫伏表测量。直到达到所需要的信号电压值。

注意：函数信号发生器作为信号源，它的输出端不允许短路。