

通信电子线路实验报告（二）——高频功率放大器

姓名：杨承翰 学号：210210226 班级：通信 2 班

实验台号：K403-21 实验日期：4.14 原始数据审核：

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，掌握其调谐特性。
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。

二、实验预习

1. 阐述高频功放的工作原理

（一）高频功率放大器的基本工作原理

高频功率放大器是一种能量转换器件，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，它也是一种以谐振回路作负载的放大器。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。

高频功放的电路原理图如图 2-1 所示（共发射极放大器），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。

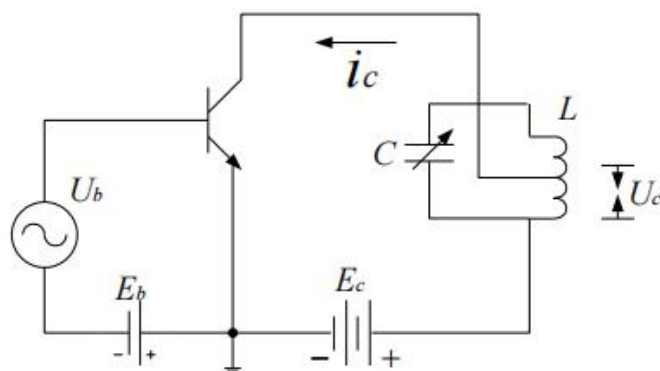


图 2-1 高频功放的电路原理图

（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。

对于周期性的余弦脉冲 i_c , 可用傅里叶级数展开:

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

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 振荡回路被调谐于信号 (角) 频率, 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的基本原理

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 2-2 所示。

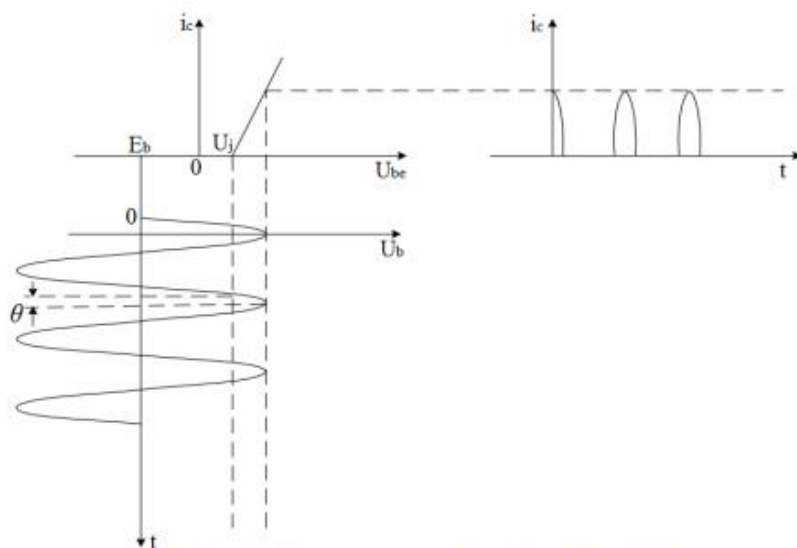


图 2-2 折线法分析非线性电路电流波形

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} 变化对放大器工作的影响如图 2-3 所示。

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})。

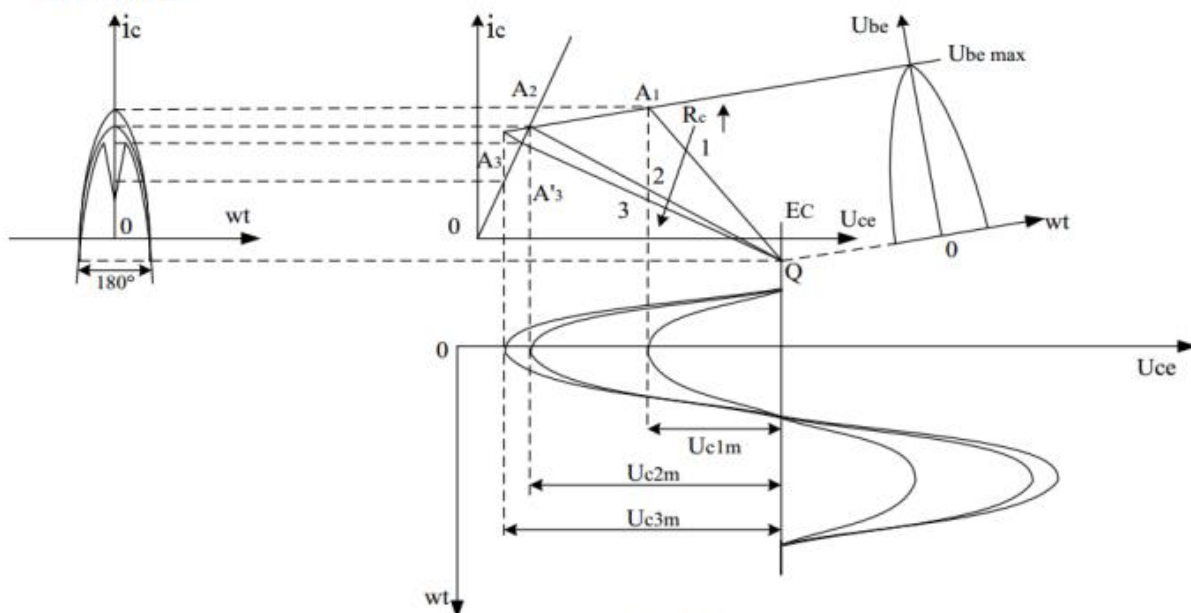


图 2-3 U_{bm} 变化对工作状态的影响

(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, 改变集电极等效电阻 R_c 对放大器工作状态的影响, 如图 2-4 所示。

图 2-4 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 QA_1 、 QA_2 、 QA_3A_3' 。其中 QA_1 对应于欠压状态, QA_2 对应于临界状态, QA_3A_3' 对应于过压状态。 QA_1 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 QA_3 与饱和线相交, 此后电流 i_c 随 U_{cm} 沿饱和线下降到 A_3' , 电流波形顶端下凹, 呈马鞍形。

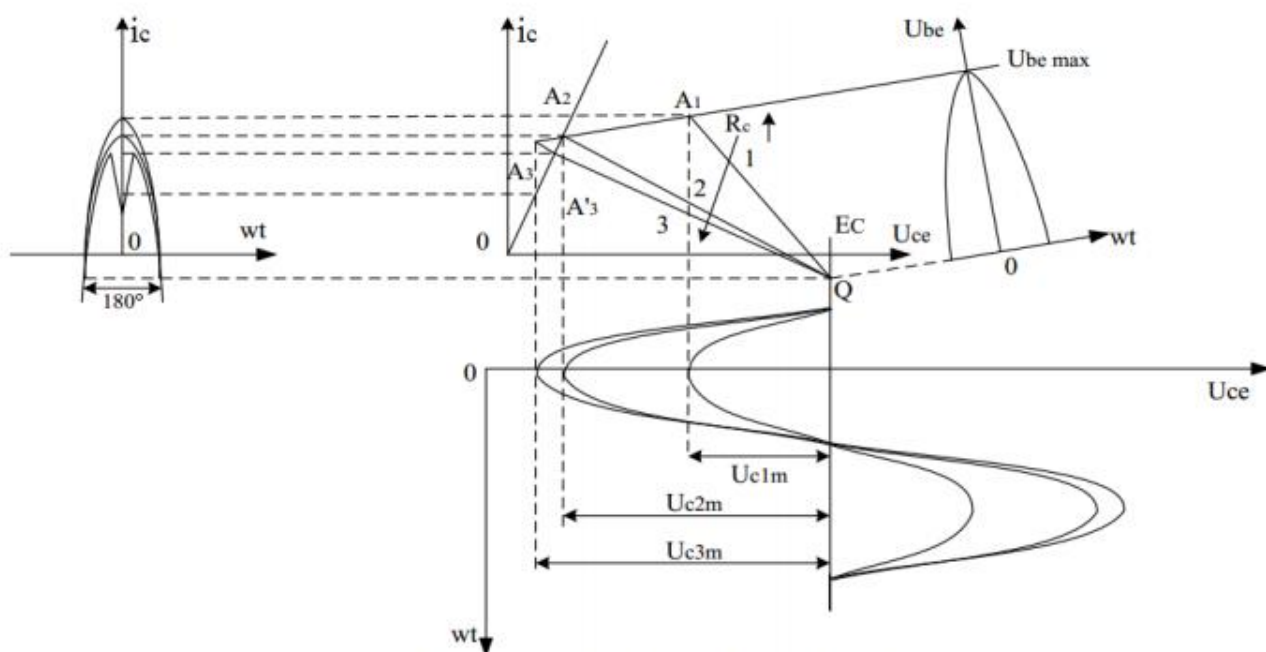
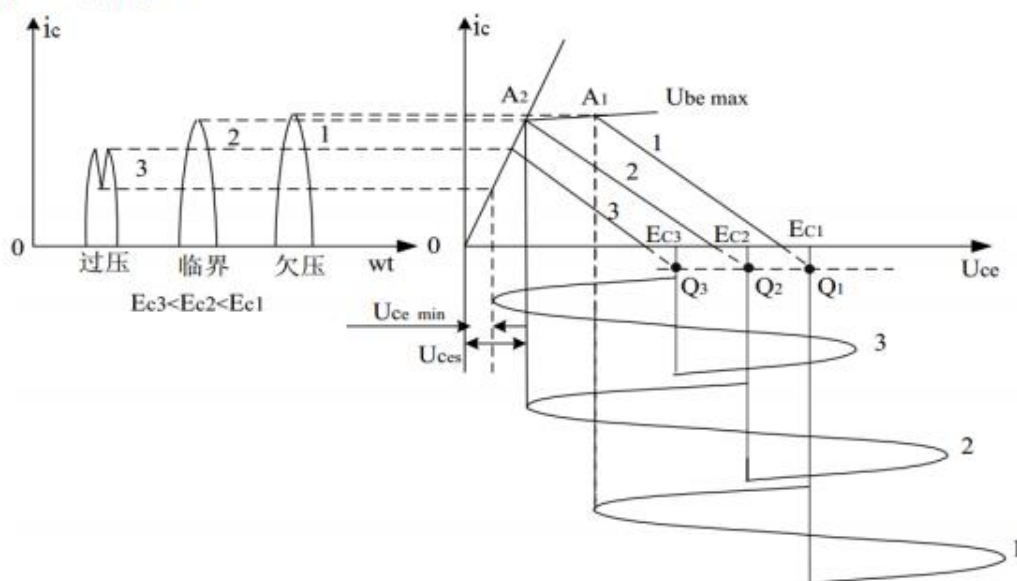


图 2-4 不同负载电阻时的动态特性

(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 2-5 所示。



由图可见， E_c 变化， U_{cem} 也随之变化，使得 U_{cem} 和 U_{ces} 的相对大小发生变化。当 E_c 较大时， U_{cem} 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_{cem} 也减小，当 U_{cem} 接近 U_{ces} 时，放大器工作在临界状态。 E_c 再减小， U_{cem} 小于 U_{ces} 时，放大器工作在过压状态。图 2-5 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。

2. 分析实验电路图 2-6，说明以下各点代表的含义

3TP2: 前置放大级输入测量点

3TP3: 前置放大级输出测量点

3TP5: 发射极测试点，可在该点测量电流脉冲波形

3TP6: 负载电阻测量点

3TP7: 3Q2 集电极输出测量点

3K1: 选定电路使用的选频回路

3K2: 控制负载电阻的接通与否

三、实验记录

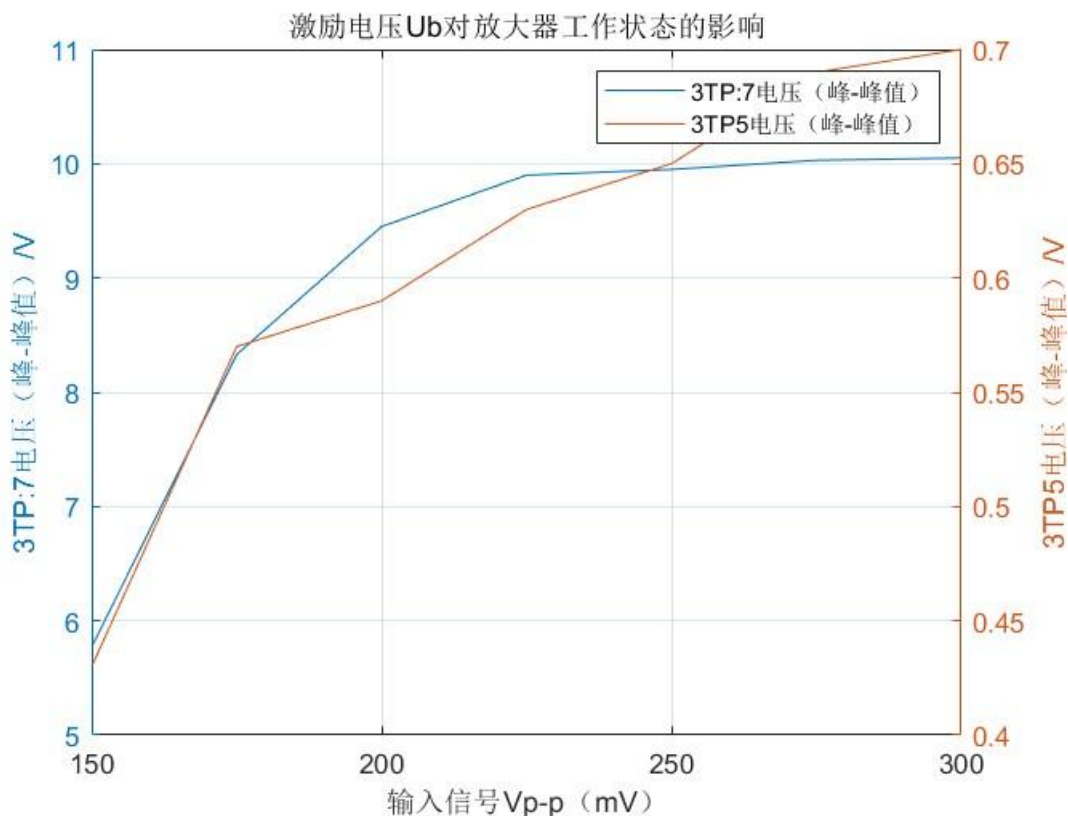
1. 激励电压 U_b 对放大器工作状态的影响:

*注: 由于每台仪器的元器件之间存在误差, 导致幅值、频率及谐振频率不完全统一, 实验时应按照实际情况适当扩充测量量, 下同。

表 2- 1

输入信号 V_{p-p} (mV)	150	175	200	225	250	275	300
3TP:7 电压 (峰-峰值)	5.77	8.33	9.45	9.90	9.95	10.03	10.05
3TP5 电压 (峰-峰值)	0.43	0.57	0.59	0.63	0.65	0.69	0.70
3TP5 状态 (欠压/临界/过压)	欠压	欠压	过压	过压	过压	过压	过压

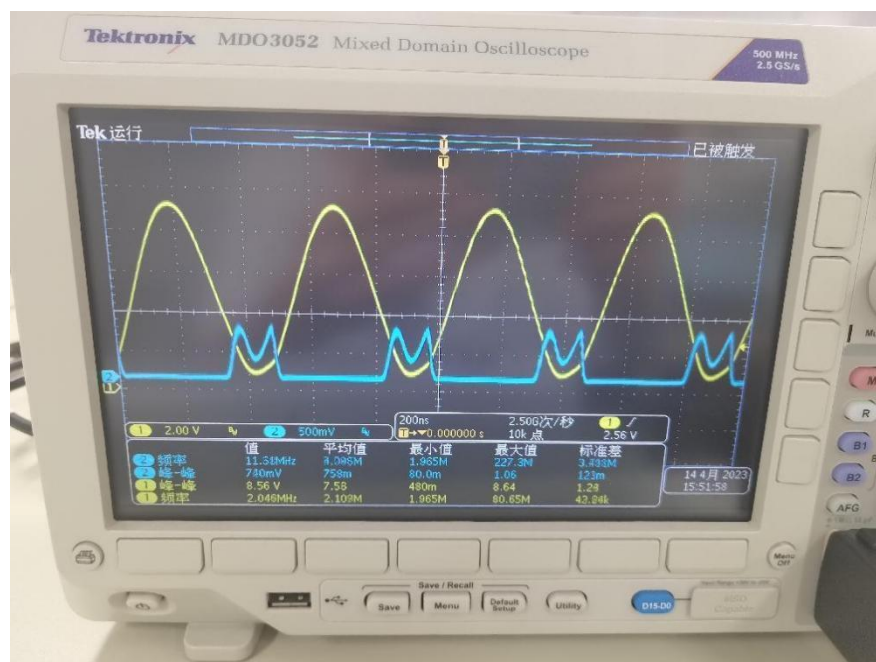
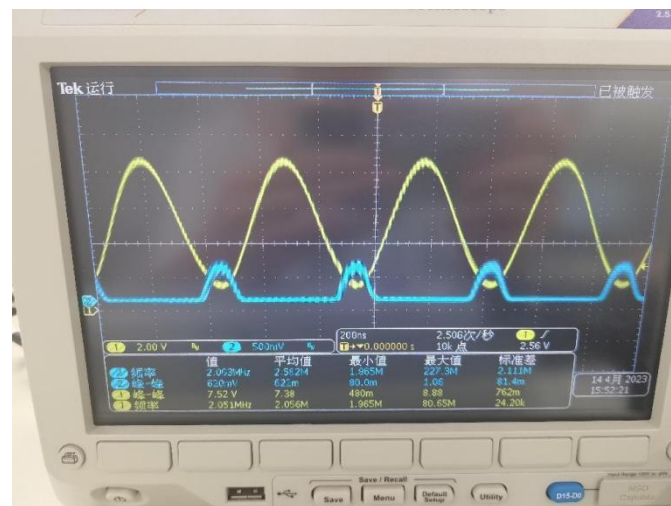
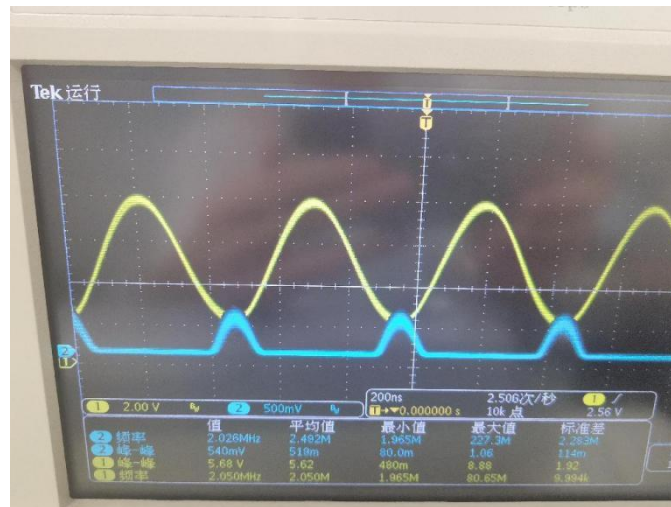
3TP5 处于临界状态时, 输入信号峰-峰值为 190mV, 3TP:7 电压峰峰值 8.09V, 3TP5 电压峰-峰值为 0.55V。



简述: 随着输入信号幅度增大, 3TP4 波形的变化趋势如何?

随着输入信号幅度增大, 3TP7 波形的峰值逐渐增大, 当工作状态达到临界后, 峰峰值逐渐趋于维持不变, 即从欠压状态逐渐到临界状态, 之后进入过压状态。

3TP5 的欠压、临界、过压三种波形：

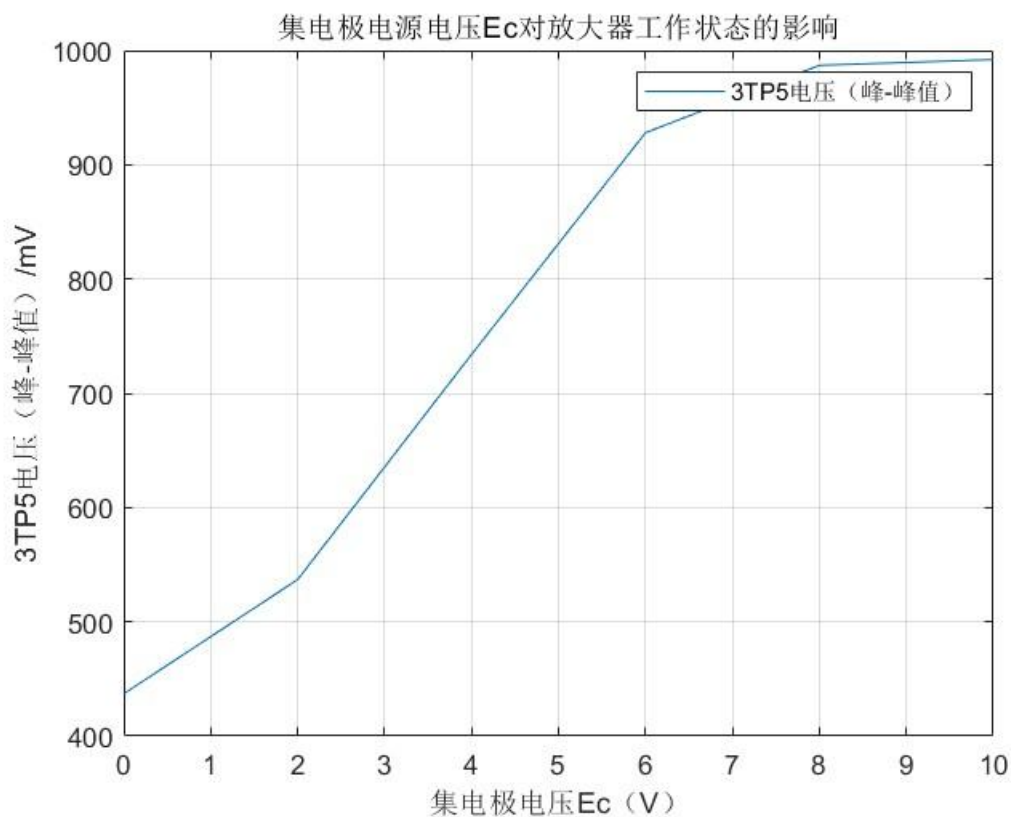


2. 集电极电源电压 E_c 对放大器工作状态的影响

表 2-2

集电极电压 E_c (V)	0	2	4	6	8	10
3TP5 电压 (峰-峰值)	437	537	734	928	987	992
3TP5 状态 (欠压/临界/过压)	过压	过压	过压	过压	欠压	欠压

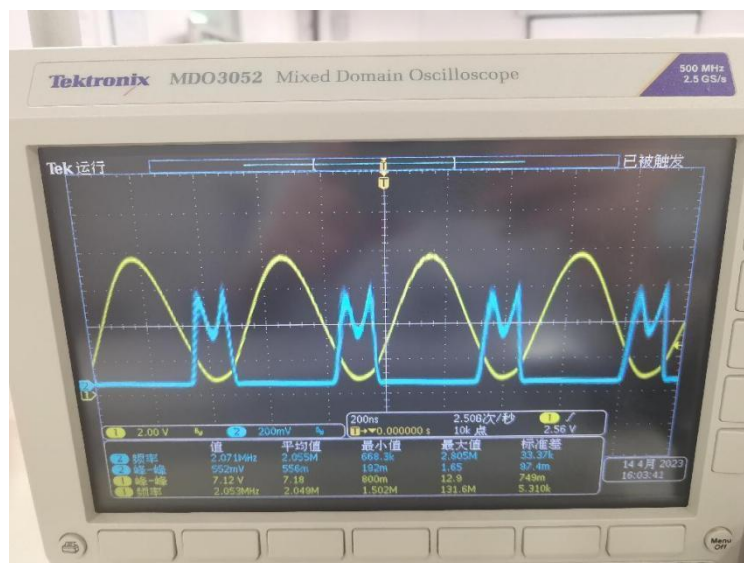
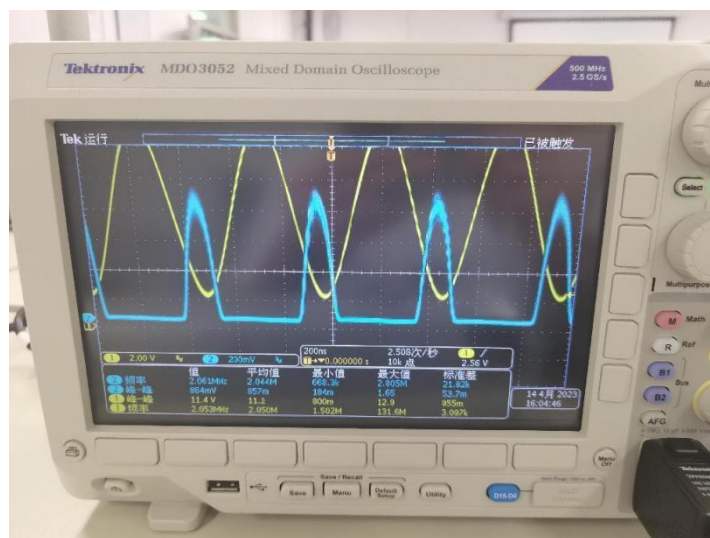
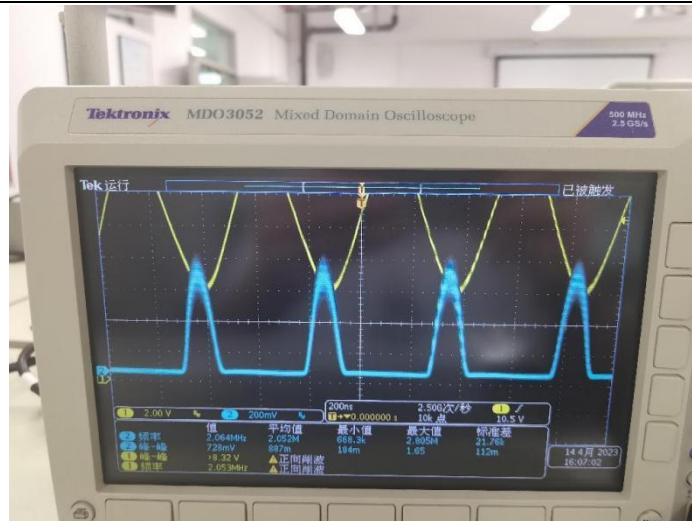
3TP5 处于临界状态时，集电极电压 E_c 为 8.5V，3TP5 电压峰-峰值为 992mV。



简述：随着集电极电源电压 E_c 增大，3TP7 波形的变化趋势如何？

随着集电极电源电压 E_c 增大，3TP7 波形的峰值逐渐增大，当工作状态达到临界后，峰峰值逐渐趋于维持不变，即从过压状态逐渐到临界状态，之后进入欠压状态。

3TP5 的欠压、临界、过压三种波形：

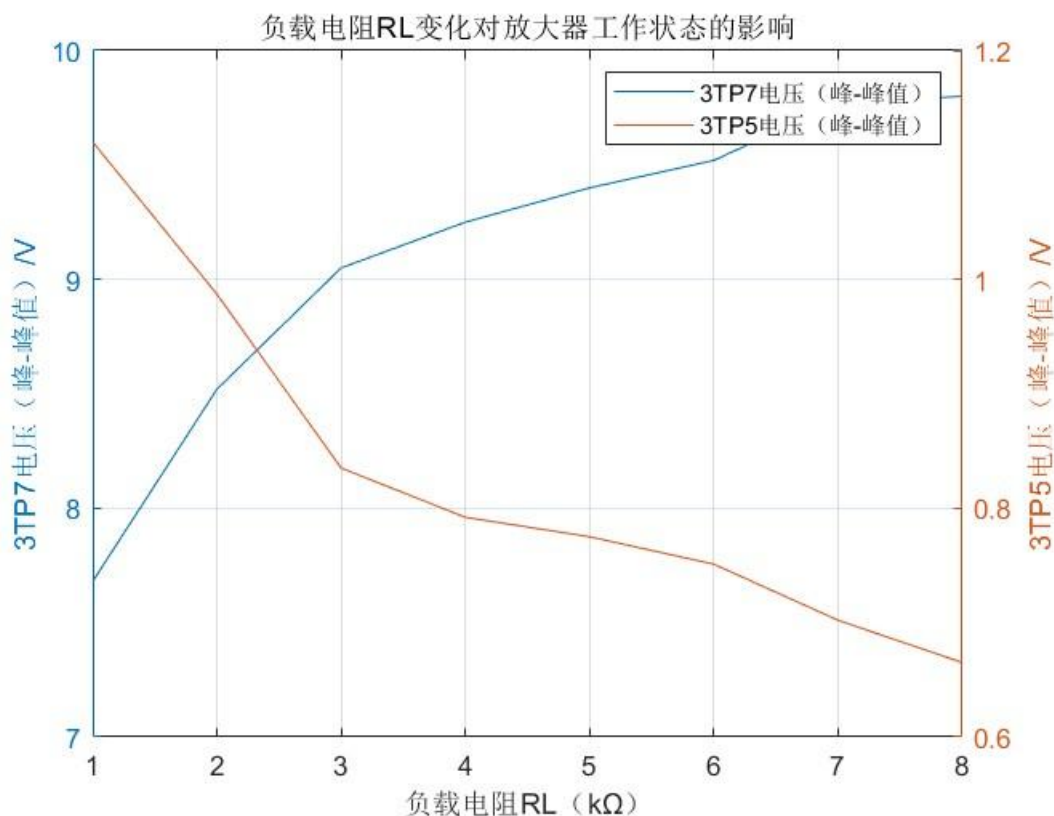


3. 负载电阻 R_L 变化对放大器工作状态的影响

表 2-3

负载电阻 R_L ($k\Omega$)	1	2	3	4	5	6	7	8
3TP7 电压 (峰-峰值)	7.68	8.52	9.05	9.25	9.40	9.52	9.77	9.80
3TP5 电压 (峰-峰值)	1.120	0.987	0.835	0.792	0.775	0.751	0.702	0.665
3TP5 状态 (欠压/临界/过压)	欠压	过压	过压	过压	过压	过压	过压	过压

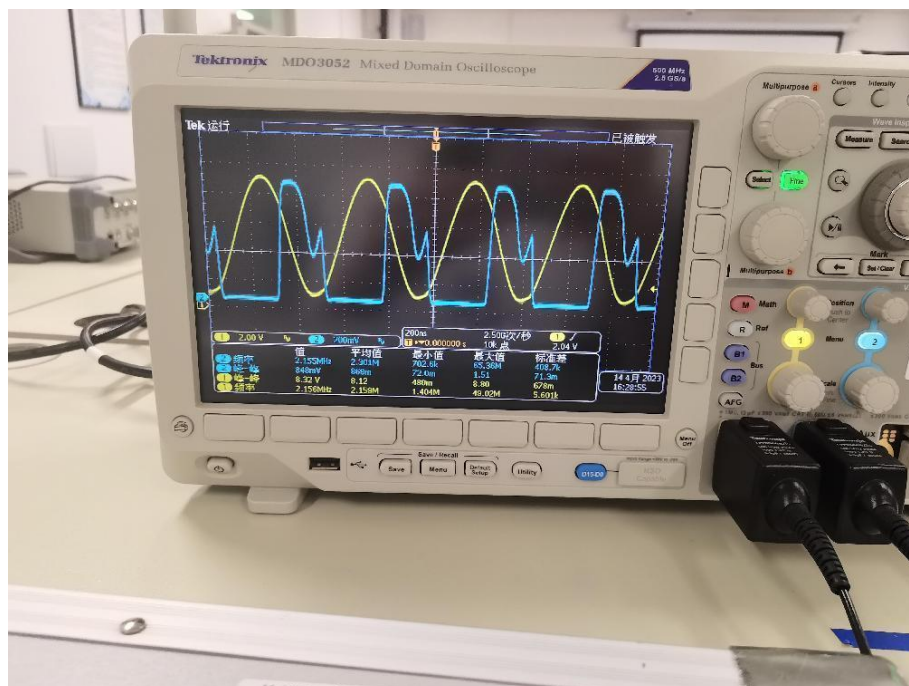
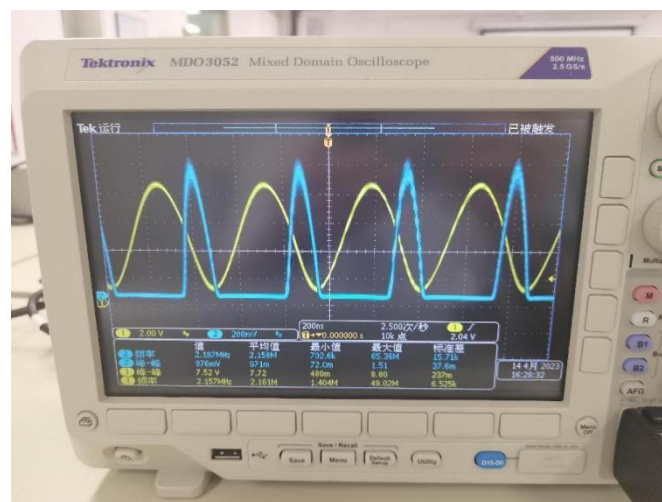
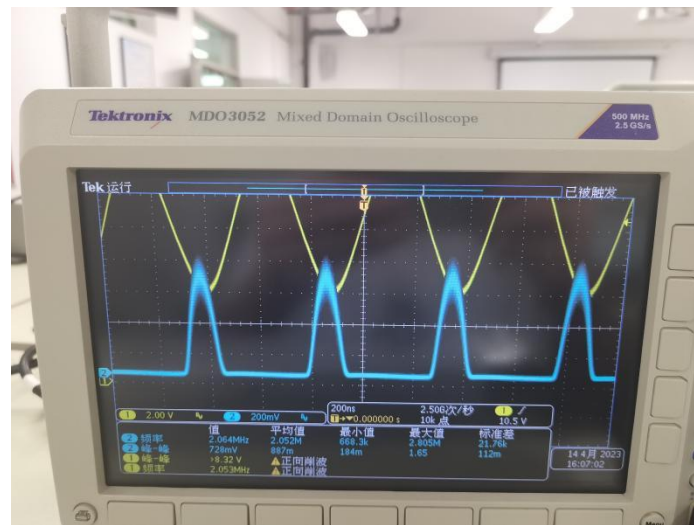
3TP5 处于临界状态时，负载电阻 R_L 为 $1.37k\Omega$ ，3TP7 电压峰-峰值为 $8.16V$ ，3TP5 电压峰-峰值为 $1.02V$ 。



简述：随着负载电阻 R_L 增大，3TP7 波形的变化趋势如何？

随着负载电阻 R_L 增大，3TP7 波形的峰值逐渐增大，当工作状态达到临界后，峰峰值逐渐趋于维持不变，即从欠压状态逐渐到临界状态，之后进入过压状态。

3TP5 的欠压、临界、过压三种波形：



四、实验思考题

高频功放与高频小信号放大器有何异同？

同：都有相应的谐振带通滤波电路，都属于有一定带宽的窄带放大器。

异：高频谐振功率放大器主要提供功率增益，高频小信号谐振放大器主要提供电压增益。

1. 功率放大器的输出功率比小信号放大器大得多，因此需要更强的电源和更大的晶体管或管子。而小信号放大器则可以使用较小的晶体管或管子。
2. 高频功率放大器通常采用类 AB 或类 C 功率放大电路，而高频小信号放大器通常采用共射、共基或共集等线性电路。
3. 高频功率放大器需要考虑输出阻抗匹配和负载匹配，以确保输出功率最大化。而高频小信号放大器则需要考虑输入阻抗匹配和输出阻抗匹配，以确保最小化噪声和失真。
4. 高频功率放大器通常用于无线电发射机、雷达、通讯系统等需要高功率输出的应用中。而高频小信号放大器则通常用于接收机、滤波器、混频器等需要低噪声和高增益的应用中。

五、实验过程与数据分析

（叙述具体实验过程，记录实验数据在原始数据表格，如需要引用原始数据表格，请标注出表头，如“实验记录见表 2-*”）

1. 根据实验结果，结合实验电路图阐述两个三极管 3Q1、3Q2 分别起什么作用？

3Q1 负责放大输入电压，使测量结果更加稳定，方便测量。

3Q2 起到放大信号的作用。三极管可以将输入信号放大到更高的电压和电流水平，从而实现功率放大。它还可以起到调节阻抗和匹配输入输出阻抗的作用，以确保信号传输的最大效率。

2.根据实验结果,分析激励电压 U_b 对放大器工作状态的影响(写出分析过程)。

增加激励电压 U_b 会导致 B 点向左移动 ($g_d = -g_c (V_{bm}/V_{cm})$)

即直线 AQ 与 OA 交点 A 点左移,从而使 i_{cmax} 降低,同时逐渐出现两个峰值,中部向下凹陷。

即增大激励电压 U_b 使放大器从欠压到临界再到过压状态。

3. 根据实验结果,分析集电极电源电压 E_c 对放大器工作状态的影响(写出分析过程)。

当集电极电源电压 E_c 增加时, Q 点向右移动。

直线 AQ 斜率不变,那么 A 点也会右移,从而使 i_{cmax} 增大,同时从两个峰值变得只有一个峰值,中部向下的凹陷消失。

即增大集电极电源电压 E_c 使放大器从过压到临界再到欠压状态。

4.根据实验结果,分析负载电阻 R_L 变化对放大器工作状态的影响(写出分析过程)。

增加负载电阻 R_L 会导致直线 AQ 的斜率绝对值减小 ($g_d = -g_c (V_{bm}/V_{cm})$)

即直线 AQ 会变得更加平缓, A 点左移,从而使 i_{cmax} 降低,同时逐渐出现两个峰值,中部向下凹陷。

即增大负载电阻 R_L 使放大器从欠压到临界再到过压状态。

六、实验体会与建议

本实验让我收获很大，动手能力增强的同时理论基础更加扎实。