

# 《非线性电路实验》预习报告

实验名称: Large-Signal Power Amplifier 指导教师: 冯鹏 fengpeng06@semi.ac.cn

姓名: 丁毅 学号: 2023K8009908031 班级/专业: 2308/电子信息 分组序号: 2-06

实验日期: 2025.11.27 实验地点: 西实验楼 (8 号楼) 308 是否调课/补课: 否 成绩:     

## 1 实验目的

- (1) 掌握谐振功率放大器的工作原理;
- (2) 掌握谐振功率放大器的调谐特性和负载特性;
- (3) 掌握集电极电源电压及负载变化对放大器工作状态的影响。

## 2 实验仪器

- (1) 谐振功率放大器实验板 (序列号……)
- (2) 示波器 RIGOL MSO2202A (序列号……)
- (3) 信号发生器 GW INSTEK AFG-2225 (序列号……)
- (4) 万用表 LINIT- UT61A (序列号……)

## 3 实验原理

### 3.1 谐振功率放大器基本原理

本实验中使用的谐振功率放大器 (PA, Power Amplifier) 为 Class-C PA (丙类功放), 采用谐振网络作为负载回路, 且导通角  $\theta \in (0^\circ, 90^\circ)$ 。

功率放大器导通角余弦值  $\cos \theta = \frac{V_{TH} - V_B}{V_{in,amp}} < 180^\circ$  时 (例如 Class-AB, Class-B 和 Class-C PA), 尽管输出波形存在属于“削波失真” (clipping distortion) 的“截断”现象, 具有非常明显的非线性失真 (高次谐波分量较多), 但由于负载为谐振网络, 输出端口的电流和电压波形经过谐振网络滤波后, 高次谐波被充分抑制, 以此实现高效的大信号功率放大。

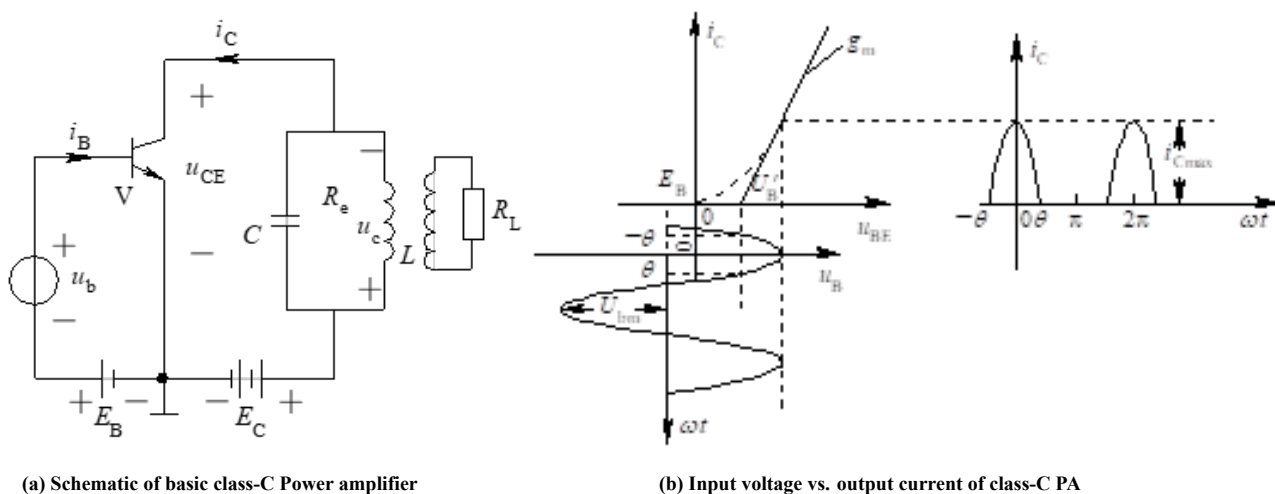


Figure 1: Class-C Power Amplifier Operating Principle

理论分析已经在非线性电路课程中详细介绍过，以下仅给出主要公式：

$$\cos \theta = \frac{V_{TH} - V_B}{V_{in,amp}}, \quad I_{\max} = g_m V_{in,amp} (1 - \cos \theta) \quad (1)$$

$$P_L := P_{out,base} = \frac{1}{2} I_{1,amp} V_{1,amp} = \frac{1}{2} I_{1,amp}^2 R_L \quad (2)$$

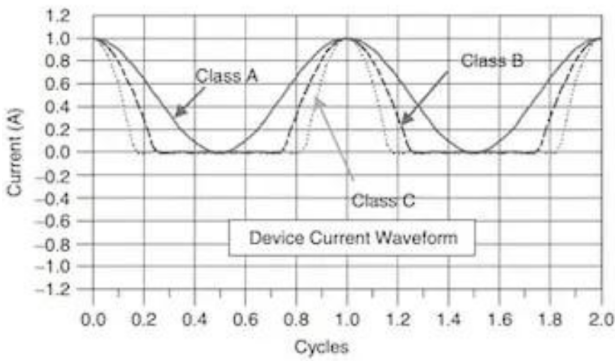
$$P_Q = I_Q V_{CC} = I_0 V_{CC} \Rightarrow \eta_C = \frac{P_L}{P_Q} = \frac{1}{2} \frac{I_{1,amp} V_{1,amp}}{I_0 V_{CC}} = \frac{1}{2} \frac{\alpha_1 V_{1,amp}}{\alpha_0 V_{CC}} \quad (3)$$

$$\alpha_0 = \frac{I_0}{I_{\max}} = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)}, \quad \alpha_1 = \frac{I_{1,amp}}{I_{\max}} = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

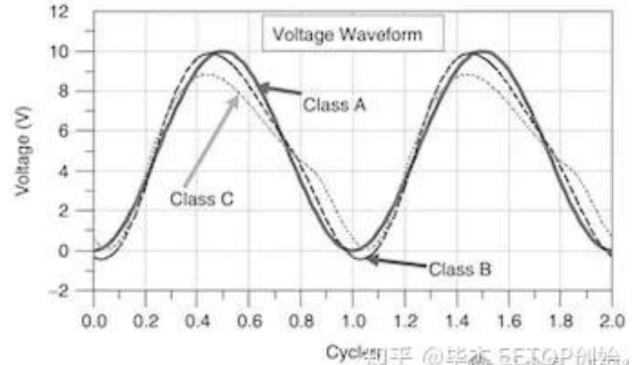
$$\alpha_n = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sin n\theta \cos \theta - n \cos n\theta \sin \theta}{n(n^2 - 1)(1 - \cos \theta)}, \quad n = 2, 3, \dots \quad (5)$$

$$I_{n,amp} = \alpha_n I_{\max} = \alpha_n g_m V_{in,amp} (1 - \cos \theta) \quad (6)$$

$$i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n \cos n\omega_0 t = I_0 + I_{1,amp} \cos(\omega_0 t) + I_{2,amp} \cos(2\omega_0 t) + \dots \quad (7)$$



(a) Current waveform of class-A/B/C power amplifier



(b) Voltage waveform of class-A/B/C power amplifier

Figure 2: Operating Waveforms of Class-A/B/C Power Amplifiers

### 3.2 谐振功率放大器的直流工作点

一个 Class-C PA 的工作状态由下面四个参数决定：

- (1) 集电极电源电压  $V_{CC}$ ，即讲义中的  $E_C$
- (2) 负载电阻  $R_L$ ，即讲义中的  $R_e$
- (3) 输入信号幅度  $V_{in,amp}$ ，即讲义中的  $U_{bm}$
- (4) 晶体管 Base 端偏置电压  $V_B$ ，即讲义中的  $U_B$

由此衍生出几种特性曲线：

- (1) 负载特性：保持其它参数不变，改变负载电阻  $R_L$  时，功率放大器的基频输出电流  $I_{1,amp}$ 、基频输出电压  $V_{1,amp}$ 、基频输出功率  $P_L$  以及集电极效率  $\eta_C$  随之变化的曲线；
- (2) 集电极调制特性(电源调制特性)：保持其它参数不变，改变电源电压  $V_{CC}$  (即集电极电压) 时，功率放大器的上述输出参数随之变化的曲线；
- (3) 输入调制特性：保持其它参数不变，改变输入信号幅度  $V_{in,amp}$  时，功率放大器的上述输出参数随之变化的曲线；

### 3.3 实验所用功放电路分析

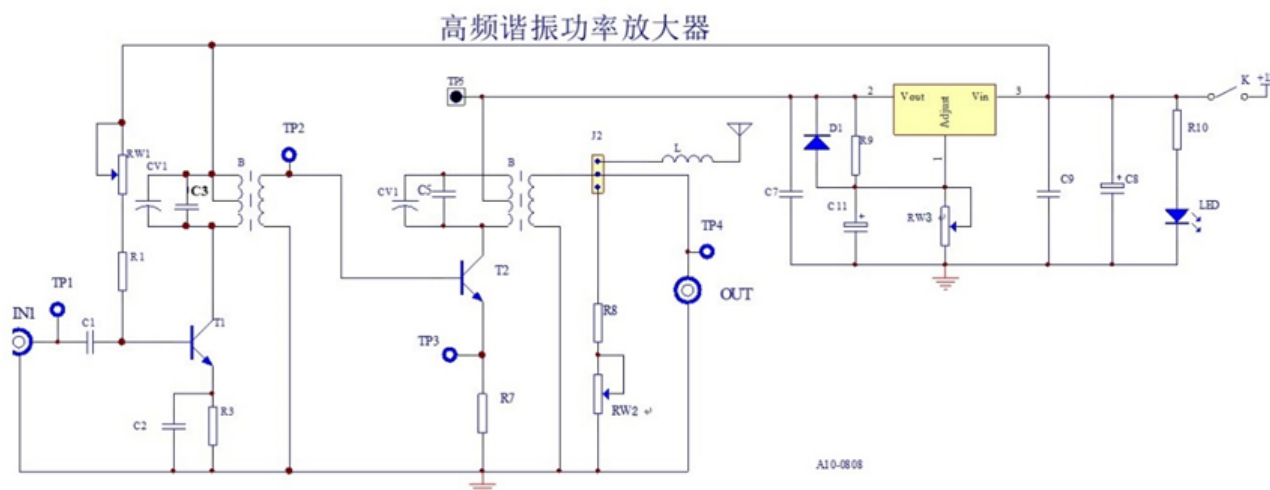


Figure 3: Schematic of The Power Amplifier Used in This Experiment

该放大器有两级，第一级放大器在基极用可变电阻调节偏置，集电极负载是一个可调 LC 谐振回路，电源电压 (集电极电压) 为 12 V；第二级集电极负载仍为 LC 谐振回路，但电源电压 (集电极电压) 由 LDO 给出，低于 12 V。RW2 和 R8 为功放负载，也可以将输出接到天线负载。

## 4 实验内容与步骤

本次实验的注意内容为“放大器的频率特性及通频带的测量”。需注意：

- (1) 调整两级放大器的可调电容，使两级放大器的谐振频率分别略低于和略高于 10.7 MHz, 但不能完全相等或相差过大；完全相等会导致频率响应曲线过于尖锐，难以测量通频带，差距过大则会导致增益明显下降，甚至出现中间窄两边高的“双峰现象”；
- (2) 为电路注入小信号时，输入信号幅度 (amplitude) 应控制在 30 mV 以内，过大会导致放大器进入非线性工作区，输出波形严重失真；

### 4.1 功率放大器直流工作点调整

- (1) 连接好电路，在实验箱主板上插上高频谐振功率放大器实验电路模块，接通实验箱电源并打开开关，指示灯点亮。由信号发生器提供 50 mVpp sinusoidal wave @ 10 MHz 给到功放的 IN1 输入端。
- (2) 在 OUT 端用示波器观测到放大后的输入信号，调整电位器 RW1/RW2，微调可调电容 CV，在 OUT 端用示波器观察输出信号状态。

### 4.2 负载调制特性测量

- (1) 调整 RW3 使第二级功放的电源电压为最大值 (测量 TP5)；
- (2) 将负载接到电阻端，保持其它参数不变，改变负载  $R_L$ ，观察电压、电流波形的变化情况；
- (3) 具体而言，改变  $R_L$  的同时，测量输出电压  $V_{1,amp}$ 、输出电流  $I_{1,amp}$  和直流偏置电流  $I_0$ ，以此计算输出功率  $P_L$  和集电极效率  $\eta_C$  等其它参数。

可先测量出 R8 的阻值，每次改变负载后断电测量 RW2 两端阻值，这样得到的是  $(R_8 \parallel RW_2)$ ，可通过数学运算得到负载  $R_L$  的值，省去了频繁拔插跳线 J2 的麻烦步骤。

数据记录表格如下：

**Table 1: Load Modulation Characteristic Data**

(断电后测量) $R_L$ (Ohm)
(AC of TP4) $V_{1,pp}$ (V)
(AC of TP3) $I_{1,pp}R_7$ (V)
(DC of TP3) $I_0R_7$ (V)

注意：为避免板子烧坏，上电前将 J2 连接到电阻端，且负载电阻总阻值不能小于 50Ohm (不能空载)，功放输出电压峰峰值不可超过 1.5V。

### 4.3 集电极调制特性测量

- (1) 保持偏置电压  $V_B$  不变，负载接天线并且将天线展开将天线展开，不断调整 RW3 以改变第二级功放的  $V_{CC}$  ( $E_C$ )，在 TP3 测量  $V_{CC}$  对电压和电流波形的影响。
- (2) 具体而言，改变  $V_{CC}$  的同时，需要测量输出电压  $V_{1,amp}$ 、输出电流  $I_{1,amp}$  和直流偏置电流  $I_0$ ，以此计算输出功率  $P_L$  和集电极效率  $\eta_C$  等参数。

数据记录表格如下：

**Table 2: Collector Modulation Characteristic Data**

(DC of TP5) $V_{CC}$ (V)
(AC of TP4) $V_{1,pp}$ (V)
(AC of TP3) $I_{1,pp}R_7$ (V)
(DC of TP3) $I_0R_7$ (V)

## 5 思考题

### 5.1 根据实验电路，分析可能会造成实验电路损坏的原因，应该采取哪些预防措施？

可能的原因：

- (1) 输入信号幅值过大或放大倍率过大，导致输出功率过大，板子烧毁；
- (2) 上电未接负载，导致输出电流过大，板子烧毁；
- (3) 断开条线 J2 前未断电，产生较强冲激电流，烧毁板子；
- (4) 板子以过大功率工作较长时间，导致负载端过热熔毁。

预防措施：

- (1) 合理控制放大倍数和输入电压幅值，控制输出功率；
- (2) 规范操作，上电前先接入负载，调节电路时断电；
- (3) 控制电路板工作时间，避免长时间工作导致过热。