

实验二 丙类谐振功率放大器与高电平调幅

一、实验电路简介

丙类高频谐振功率放大器与高电平调幅实验电路如图 3.2.16 所示。

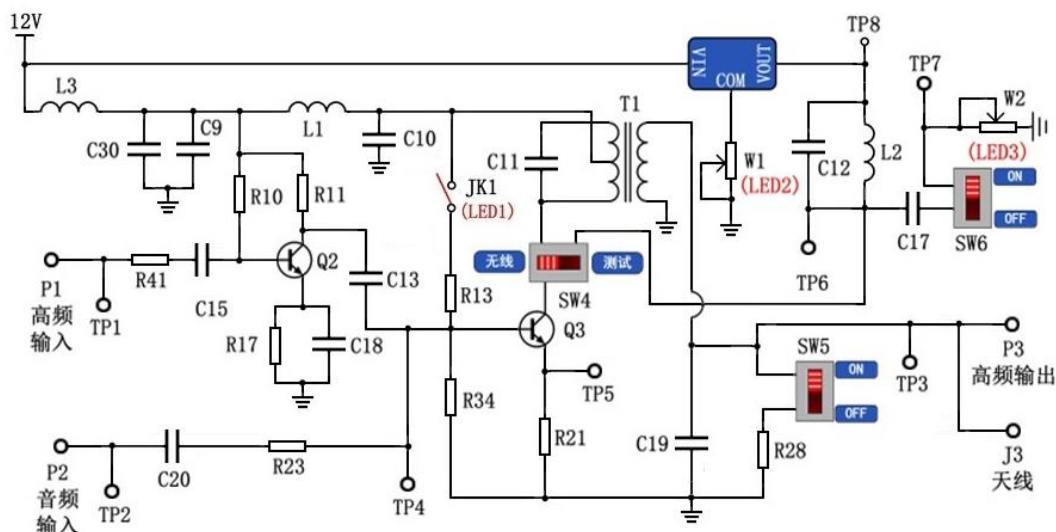


图 3.2.16 丙类高频功率放大器与高电平调幅实验电路

本模块的高频功放电路完成以下主要功能：

丙类功放电路特性测试（欠压、临界、过压状态）、基极调幅、功放调谐特性测试（功放调谐、输出功率测量）、用作射频前端的功放（调幅波的功放）。

进行功率放大时，高频信号从 P1 或 TP1 端口输入，经过功放后，从 P3 或 TP3 端口输出。

本实验电路由两级放大器组成。

前级放大电路：Q2 是前级放大管，工作在线性状态，以放大从 P1 端口输入的较小幅度的信号。该级的集电极负载为电阻，因此不具有选频滤波的作用，可作为调幅放大和调频放大。

丙类高频功率放大器电路 1：当 JK1 开关断开（功放为丙类）、SW4 为左“无线”时，选频电路由 C11、T1 构成，谐振频率为 10.7MHz 左右。Q3 为丙类高频功率放大管，用于进行功放调谐特性测试（功放调谐、输出功率测量）、基极调幅（产生调幅波）。

丙类高频功率放大器电路 2：当 JK1 开关断开（功放为丙类）、SW4 为右“测试”时，选频电路由 C12、L2 构成，谐振频率为 2MHz 左右。Q3 为丙类高频功率放大管，其基极偏置电压为 0，通过发射极上的电压构成反偏，在载波的正半周且幅度足够大时使功放管导通，可获得较大的功率输出。此模式可测量放大器三种状态（欠压、临界、过压）下的电流脉冲波形 i_c ，设计为 2MHz 左右的频率，主要是考虑到频率较低时测量效果比较好。

甲类高频功放电路：当 JK1 开关接通（功放为甲类）、SW4 为左“无线”时，Q2 和 Q3 均工作在线性放大状态，仅用于对调幅波或调频波进行无线发送前功率放大。

基极调幅：当进行基极调幅时，根据晶体管的基极调制特性，音频信号即调制信号从 P2 送入，载波信号从 P1 端口输入与晶体管的基极相连，已调信号从 P3 端口输出。

参数调整与控制：

W1：为数字电位器，用来调整电源 V_{CC} ，通过显示屏触摸对应的可变电阻，点击或长按 W1 可调整其阻值。也可通过本模块右侧的选择键●（SW2）先选中 W1，选中时，相应的 LED 会点亮，然后通过上键▲（SW3）和下键▼（SW1）进行阻值调节。

W2：为数字电位器，用来调整丙类功放的负载电阻，通过显示屏触摸或物理按键调节，方法同 W1。

JK1：为电子开关，断开为“丙类”，用于丙类功放电路的实验。接通为“甲类”，使 Q2 和 Q3 均工作在线性放大状态，仅用于对调幅波或调频波进行无线发送前功率放大。

SW4：为左“无线”时，用于构成无线发送机的前端放大电路，进行调幅波和调频波的放大。为右“测试”时，仅用于丙类功放三种工作状态的 i_c 波形测量，此模式下 Q3 工作在丙类状态，当输入信号为调幅波时，波谷幅度较小，Q3 可能无法导通，会导致功放输出波形严重失真。

SW5：为上“ON”时，功放负载为 100Ω ，仅用于测试功放电路的输出功率。为下“OFF”时，用于进行丙类功放的实验测试，功放后的信号可输出到 TP3 或 P3，也可输出到天线(J3)进行发送等。

SW6：为上“ON”时，接入可调负载 W2，用于负载特性测试。为下“OFF”时，断开负载，使用万用表可测试 W2 的当前阻值。

测试端口说明：

P1：为高频信号输入端口，其在线测试点为 TP1

P2：为音频信号/低频信号输入端口，其在线测试点为 TP2

P3：为高频信号输出端口，其在线测试点为 TP3

Q2 各电极测试点：PCB 板上预留有对应接触式测试点

TP4：为 Q3 基极的示波器测试点

Q3 各电极测试点：PCB 板上预留有对应接触式测试点

TP6：为通过 W1 调整后的 V_{CC} 测试点，使用万用表测量


TP7：为功放的负载电阻测试点，使用万用表测量

J3：为 FM 频段射频天线接口

二、 实验内容

（一）丙类功率放大器电路搭建

1、 实验电路搭建

G05 模块断电（主控单元可保留电源开启）状态下，按图 3.2.17 进行连线：（注：图中符号表示同轴电缆高频连接线，有两种规格，参见“实验平台简介-电缆线说明”）

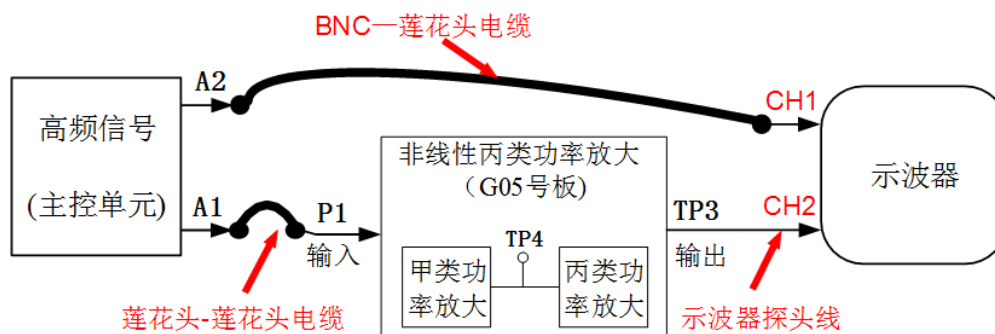


图 3.2.17 丙类功放电路连线框图

2、参数设置

(1) 开启 G05 号模块的电源，从人机交互显示屏进入实验原理图界面，路径：【主界面】→【实验项目】→【高频功率放大】→【丙类功率放大实验】。

主控或信号源参数设置如表 3.2.1 所示。（调节主控面板上的 W1 改变信号源输出频率，调节主控面板上的 W2 改变信号源输出幅度。）

表 3.2.1 丙类功放信号参数设置及连线表

源端口	目的端口	连线说明
主控&信号源：A1【参考 P6，A1=A2】 ($V_{ipp}=200\text{mV}$ 左右， $f_s=10.7\text{MHz}$)	G05 号板： P1 或 TP1	高频小信号输入

(2) 开关设置

JK1 断开，功放为“丙类”工作状态（LED1 灭）

SW4 为左“无线”，选频电路由 C11、T1 构成。

SW5 为下“OFF”，不使用固定负载。

SW6 为下“OFF”，负载为空载状态。

(二) 前级放大器的测量

(1) 参照图 3.2.17，使用示波器 CH1 测量功放模块输入端信号，使主控-高频信号源的 A1 或 A2 口输出正弦波，参数测试值为幅度：150mV_{pp}、频率：10.7MHz。此时示波器 CH1 通道设置为（1：1）模式。

(2) 然后将示波器 CH3 通道观测前级放大器的输出端 TP4，此时示波器 CH3 通道设置都为（10：1）模式。

(3) PCB 上已预留了三极管的静态工作点测试点，有兴趣的同学可以使用万用表 DCV 功能进行测量。

(4) 测量并记录此时输入信号（P1 或 TP1）的波形及幅度，以及 TP4 处输出信号的波形及幅度，计算前级放大器的放大倍数。

$$A_v = \frac{V_{TP4}}{V_{A2}}$$

(三) 丙类功放调谐特性(放大特性)的测试

1、参数设置

JK1 断开，为丙类状态（LED1 灭）

SW4 为左“无线”，选频电路由 C11、T1 构成。

SW5 为下“OFF”，不使用固定负载。

SW6 为下“OFF”，负载为空载状态。

主控&信号源：设置主控-高频信号源输出频率为 10.7MHz，幅度为 150mVpp。

2、实验测试

(1) 谐振状态的调整：使用示波器 CH1（1:1）测量功放输入端 P1 或 TP1 处信号（即主控-高频信号源的 A1 或 A2），使用示波器 CH2（10:1）观察功放输出端 TP3 处信号的波形。调整 T1，使 TP3 处输出信号的波形最大不失真，记录峰峰值填入表 3.2.2。

(2) 调谐特性测试：保持高频功放输入信号（即主控-高频信号源的 A1 或 A2）的幅度不变，设置高频信号源的频率步进为 100K，调节主控面板上的 W1，以改变高频功放输入信号的频率。观测在不同频率信号下 TP3 处输出信号的峰峰值电压，并将对应的实测值填入表 3.2.2。

表 3.2.2 调谐特性测试数据表

V_{ipp} (P1 或 TP1)(mV)					150				
f_i (P1 或 TP1)(MHz)	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1
V_{opp} (TP3) (V)									
增益 A_v (dB)									

(3) 根据表 3.2.2 的内容画出 A_v-f 特性曲线。

(四) 丙类功放输出功率的测量

1、参数设置

JK1 断开，为丙类状态（LED1 灭）

SW4 为左“无线”，选频电路由 C11、T1 构成。

SW5 为“ON”，使用 100Ω 固定负载。

SW6 为下“OFF”，可变负载不接入。

主控&信号源：设置主控-高频信号源的 A1 或 A2 输出频率为 10.7MHz。

G05 号板 W1 W2、：为模块上电后的默认值。

2、实验测试

(1) 谐振状态的调整：使用示波器 CH1（1:1）测量功放输入端 P1 或 TP1 处信号（即主控-高频信号源的 A1 或 A2），调节主控面板上的 W2，使输入信号幅度为 200mVpp 左右。

使用示波器 CH2（10:1）观察功放输出端 TP3 处信号的波形，调整 T1，使 TP3 处输出信号的波形最大不失真。

(2) 功放输出最大幅度测量：调节主控面板上的 W2，增大输入端 P1 或 TP1 处信号的幅度（即主控-高频信号源的 A1 或 A2），使 TP3 处输出信号的波形达到最大且不失真（不再随输入幅度增长而增大），记录 TP3 处输出信号的波形及参数。

(3) 功放输出功率计算：

将 TP3 处测量得到的最大不失真峰峰值 V_{pp} 转换成有效值 V_{rms} ，此时输出负载为 100Ω 的电阻，代入下面公式中，可计算出输出功率 P_o 。

$$P_o = V_{rms}I = \frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{(V_{pp} \div 2.828)^2}{100}$$

(五) 丙类功放电压 u_b 对放大器工作状态的影响

1、参数设置

JK1 断开，为丙类状态（LED1 灭）

SW4 为左“无线”，选频电路由 C11、T1 构成。

SW5 为“ON”，使用 100Ω 固定负载。

SW6 为下“OFF”，可变负载不接入。

主控&信号源：设置主控-高频信号源输出频率为 10.7MHz，幅度约为 500mVpp。

G05 号板 W1、W2：为模块上电后的默认值。

2、实验测试

改变 u_b （即 u_i ）：使用示波器 CH1（1:1）测量 P1 或 TP1 处输入信号（即主控-高频信号源的 A1 或 A2），调节主控面板上的 W2，改变输入信号的幅度。用示波器其它通道（10:1）观察在不同激励电压下 TP5 处的 u_e 波形和 TP3 处输出 u_o 波形，并将对应的实测值填入表 3.2.3。

表 3.2.3 u_b 对丙类功放工作状态的影响测试数据表

f_i （P1 或 TP1）/MHz	10.7		
u_i （P1 或 TP1）/mVpp	$U_{i(\text{临界})} - 100\text{mV}$	$U_{i(\text{临界})}$	500
u_e 波形（TP5）（ u_e 波形需测试波形峰值及凹陷深度值）			
工作状态		临界	
u_{orms} （TP3）/V			
P_o （TP3）/mW			

注意：当 u_e 波形不对称时，可以调整 T1 使其对称后再测试。

(六) 丙类功放集电极电压 V_{CC} 对放大器工作状态的影响

1、参数设置

JK1 断开，为丙类状态（LED1 灭）

SW4 为右“测试”，选频电路由 C12、L2 构成。

SW5 为下“OFF”，不使用固定负载。

SW6 为上“ON”，负载阻值稍后调节。

主控&信号源：设置主控-高频信号源输出频率为 2MHz，幅度 200mVpp。

G05 号板 W1：调节 W1，使用万用表 DCV 测量 TP6 到地直流电压（ V_{CC} ）为 5V 左右（后面根据工作状态再进行微调）。

G05 号板 W2：调节 W2，使万用表离线测 TP7 到 GND 电阻为 1K Ω （这里先将 SW6 置为“OFF”，进行离线测量 TP7 到 GND 的电阻，测完再将 SW6 置为“ON”）。

2、实验测试

改变 G05 号板 W1（选定 LED2，调整 G05 号板的 W1），使用示波器观察在不同集电极电压 V_{CC} 下 TP5 处的 u_e 波形及 TP7 处输出信号的幅度，并将实测值对应填入表 3.2.4。

表 3.2.4 V_{CC} 对丙类功放工作状态的影响测试数据表

输入信号（P1 或 TP1）	2MHz, 200mVpp		
V_{CC} 测量方法	万用表测量 TP6 到地		
V_{CC} (V)	$V_{CC(\text{临界})} - 1.5V$	$V_{CC(\text{临界})}$	$V_{CC(\text{临界})} + 1.5V$
u_e 波形（TP5）（ u_e 波形需测试波形峰值及凹陷深度值）			
工作状态	欠压	临界	过压
u_{orms} (TP7) /V			
P_o (TP7) /mW			

注意：

（1）万用表测量负载电阻时，先将 SW6 置为“OFF”，进行离线测量 TP7 到 GND 的电阻，测完将 SW6 置为“ON”。

（2）当 u_e 波形不对称时，可以调整主控-高频信号源的输出频率，将步进改为 1KHz，微调主控面板上的 W1。

（3） u_e 波形需测试波形峰值及凹陷深度值。

(七) 丙类功放负载特性的测试

1、参数设置

JK1 断开，为丙类状态（LED1 灭）

SW4 为右“测试”，选频电路由 C12、L2 构成。

SW6 为上“ON”，接入可变电阻负载。

输入频率设置：调节主控面板上的 W1，使主控-高频信号源输出频率为 2MHz。

输入幅度设置：使用示波器 CH1（1:1）测量功放输入端（即主控-高频信号源的 A1 或 A2），调节主控面板上的 W2，使输入信号幅度为 200mVpp。

2、实验测试

（1）将 SW6 置为“OFF”，调整 G05 号板的 W2，使万用表测量的 TP7 到 GND 的电阻值（即 R_L ）为 3 K Ω 。

（2）将 SW6 置为“ON”，调节 G05 号板得 W1，使丙类功放达到临界状态。

（3）改变负载（调整 G05 号板的 W2），用示波器观察在不同负载阻值下 TP5 处的 u_e 波形和 TP7 处的波形，并将对应的实测值填入表 3.2.5。

表 3.2.5 负载特性测试数据表

输入信号（P1 或 TP1）	2MHz, 200mVpp		
负载 R_L 测量方法	先将 SW6 置为“OFF”，进行离线测量 TP7 到 GND 的电阻，测完将 SW6 置为“ON”		
R_L	1K Ω	3 K Ω	10K Ω
u_e 波形（TP5）（ u_e 波形需测试波形峰值及凹陷深度值）			
工作状态		临界	
u_{orms} （TP7）/V			
P_o （TP7）/mW			


注意：（1）万用表测量负载电阻时，切记先将 SW6 置为“OFF”，进行离线测量 TP7 到 GND 的电阻，测完将 SW6 置为“ON”。

（2）当 u_e 波形不对称时，可以调整高频信号源的输出频率，将步进改为 10KHz 或 1KHz，微调主控面板上的 W1。

（3） u_e 波形需测试波形峰值及凹陷深度值。

(八) 基极调幅

1、基极振幅调制实验电路搭建

(1) G05 模块断电（主控单元可保留电源开启）状态下，按图 3.2.18 进行连线：（注：图中符号表示同轴电缆高频连接线）

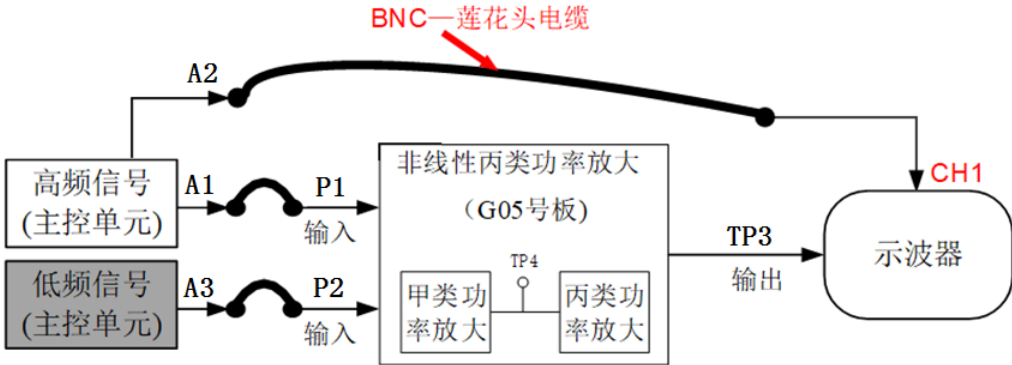


图 3.2.18 基极调幅电路连线框图

(2) G05 号模块：开启模块电源，从人机交互显示屏进入实验原理图界面，路径：【主界面】→【实验项目】→【高频功率放大】→【基极振幅调制实验】

(3) G05 号模块：JK1“断开”，为丙类状态（LED1 灭）。

SW4 为左“无线”，工作在调谐放大模式。

SW5 为下“ON”，使用 100Ω 固定负载。

SW6 为下“OFF”，负载为空载状态。

2、调幅波的观测

(1) 参数设置

信号源设置如表 3.2.6 所示。

表 3.2.6 基极调幅信号源设置及连线表

源端口	目的端口	连线说明
主控&信号源：A1 $f_c = 10.7\text{MHz}$, $u_{c\text{pp}} = 200\text{mV}$	G05 号板：P1 示波器 CH1 通道（1:1）	高频载波 u_c 输入
主控&信号源：A3 $f_\Omega = 1\text{KHz}$, $u_{\Omega\text{pp}} = 1\text{V}$	G05 号板：P2 示波器其它通道（10: 1）	低频调制信号 u_Ω 输入

(2) 实验测试

① 谐振电路的调整：先撤去音频输入 P2 端口的电缆线，使用示波器观察 TP3 处输出信号的波形，调整 G05 号板 T1，使 TP3 处输出信号的波形幅值达最大。观察记录此时 TP5 处 u_c 波形，确定功放工作在欠压状态。

② 调幅波观测：接上音频输入 P2 端口的电缆线，用示波器观察 TP2 处的 u_{Ω} 和 TP3 处的 u_{AM} 信号波形，若已调波出现失真，可通过减小高频载波 u_c 或低频调制信号 u_{Ω} 的幅度解决，记录调幅波 $m < 1$ 时的 u_{Ω} 、 u_c 及 u_{AM} 的波形和参数。

③ 测量基极调幅波的调制度 m ，测量方法如图 3.2.19 所示。

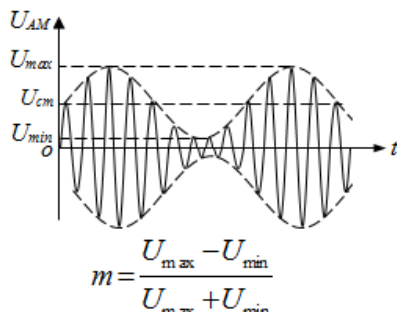


图 3.2.19 调制度 m 的测量

对于正负半周对称的 AM 波，由波形图可得

$$mU_{cm} = U_{max} - U_{cm} = U_{cm} - U_{min}$$

则调制度为

$$m = \frac{U_{max} - U_{cm}}{U_{cm}} = \frac{U_{cm} - U_{min}}{U_{cm}} = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}}$$

④ 改变低频调制信号的幅度 u_{Ω} （即设置低频信号源，调节主控面板上的 W2），观察记录 u_{AM} 波形和 m 值的变化。

3、用频谱仪（射频输入 【RF IN】）观察基极调幅的 u_{Ω} 、 u_c 和 u_{AM} 的频谱

(1) 观察记录 u_{Ω} 的频谱（ $f_{\Omega}=15\text{KHz}$ 正弦波）：频谱仪【RF IN】接入 P2 或 TP2，【中心频率】：15KHz→按【Marker】→激活频标 1。

(2) 观察记录 u_c 的频谱：频谱仪【RF IN】接入 P1 或 TP1，【中心频率】：10.7MHz→按【Marker】→激活频标 1。

(3) 观察记录 u_{AM} 的频谱：频谱仪【RF IN】接入 P3 或 TP3，【中心频率】：10.7MHz→选择【AMPT】，调节参考电平使频谱图位于屏幕之内→选择【Span】，输入 50KHz→按【Peak】→按【Marker】→激活频标 1→[差值]，移动频标 1 至两个边频之一的峰值，读取频率差值 Δf （载波频率与边频频率之差）；再读取幅度差值 ΔA ，计算调制度。

$$m = \frac{2}{10^{|\Delta A|/20}}, \text{ 式中 } \Delta A \text{ 为载波与边频的幅度差值。}$$

(4) 增大或减小低频 u_{Ω} 的幅值，观察记录 AM 信号频谱及 m 值的变化。

三、 实验仪器及设备

- 1、 主控、G05 模块（高频功放与无线发射模块）
- 2、 DSO-X 2014A 数字存储示波器
- 3、 SA1010 频谱分析仪
- 4、 34450A 台式万用表

四、 思考题

- 1、 如何有效提高丙类功放的效率？
- 2、 为什么说振幅调制是一种频谱线性搬移过程？
- 3、 基极调幅要求功放处于哪种工作状态，为什么？
- 4、 集电极调幅要求功放处于哪种工作状态，为什么？

五、 实验报告要求

- 1、 简述实验原理。
- 2、 画出实验电路图。
- 3、 整理实验波形、实验数据、作出曲线图。
- 4、 对实验现象、波形、数据、曲线、误差、感受等进行分析。
- 5、 回答思考题。