

## 2.12 射频功率放大器实验

### 一、实验目的

- (1) 进一步理解射频功率放大器的工作原理；
- (2) 了解射频功率放大器的工程设计方法与常用参数的测量方法；
- (3) 熟悉 Multisim 软件中常用虚拟测试仪器的使用方法。

### 二、实验原理

#### 1、射频功率放大器的基本概念

射频功率放大器是无线通信系统的重要组成部分，位于无线通信系统的发射前端。其作用是将已调制的射频信号放大到所需要的功率值并馈送到天线发射出去，保证在一定区域内的接收机可以收到可以处理的信号，并且不干扰相邻信道的通信。

射频功率放大器的主要功能是放大射频信号，其工作可频率最高可到 GHz 频段。其输出功率则取决于应用要求，一般从几毫瓦到上千瓦。由于功率放大的实质是在输入射频信号控制下将电源直流功率转换成射频功率，因此，除要求功率放大器产生符合要求的射频功率外，还特别要求具有尽可能高的转换效率。

射频功率放大器的工作特点是低电压、大电流。其基本组成单元包括晶体管、偏置电路、扼流圈、阻抗匹配网络与负载。射频功率放大器的主要参数除了常规的工作频率、小信号增益等指标外，还要特别考虑输出功率、效率等参数。

效率是功率放大器一个非常重要的性能指标。射频功率放大器中的效率定义为射频输出功率与射频功率放大器总功耗之比，即：

$$\eta = P_o / P_D \quad (2-12-1)$$

功率放大器按照电路中晶体管输出电流与输入电压或电流的关系可分为线性功率放大器和开关功率放大器两大类。线性功率放大器是指晶体管的输出电流是输入电流或电压的线性函数，而开关功率放大器的晶体管则工作在开关状态。按照电路中晶体管的直流偏置状态，功率放大器又可分为 A 类、B 类、C 类、D 类等，其中，A 类、B 类、C 类为线性功率放大器，D 类则为开关功率放大器。

在设计射频功率放大器时，对功率管的要求较高，需要考虑最大击穿电压  $V_{(BR)CEO}$ ，最大集电极电流  $I_{CM}$ ，最大管功耗  $P_{CM}$  以及最高工作频率  $f_{max}$  等。

#### 2、线性射频功率放大器

##### 2.1 A 类功率放大器

A 类功率放大器相当于小信号放大器，也是“真正”的线性放大器，因为，在整个输入信号周期内，输出信号是输入信号的按比例增大而没有发生变化，可完全适于放大幅度调制信号。但是，与其它类功放相比，这种“真正”线性的获得是以需要大静态工作电流和高功耗以及低效率为代价的。工作电路如图 2.12.1 所示。

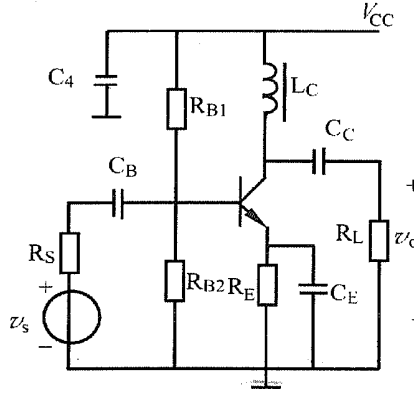


图 2.12.1 A类功放原理图

该电路与一般小信号线性放大电路完全相似，所不同的是为了减小损耗，集电极电阻  $R_c$  改用扼流圈  $L_c$ ， $R_E$  也尽可能小。偏置电阻  $R_{B1}$ 、 $R_{B2}$ 、 $R_E$  保证电路偏置在 A 状态。

对于正弦信号输入， $i_c$  由直流分量  $I_{CQ}$  和交流分量  $i_{cm}$  组成：

$$i_c = I_{CQ} + I_{cm} \sin \omega t, \quad I_{cm} \leq I_{CQ} \quad (2-12-2)$$

$$v_{CE} = V_{CEQ} - I_{cm} R_L \sin \omega t = V_{CEQ} - I_{cm} R_L \sin \omega t \quad (2-12-3)$$

所以，交流输出功率为

$$P_o = \frac{1}{2} I_{cm}^2 R_L \leq \frac{1}{2} I_{CQ}^2 R_L \quad (2-12-4)$$

电源供给功率为

$$P_D = I_{CQ} V_{CC} \leq \frac{V_{CC}^2}{R_L} \quad (2-12-5)$$

因此，效率为

$$\eta = \frac{P_o}{P_D} = \frac{I_{cm}^2 R_L}{2 V_{CC}^2} \leq \frac{I_{cm}^2 R_L^2}{2 V_{CC}^2} \quad (2-12-6)$$

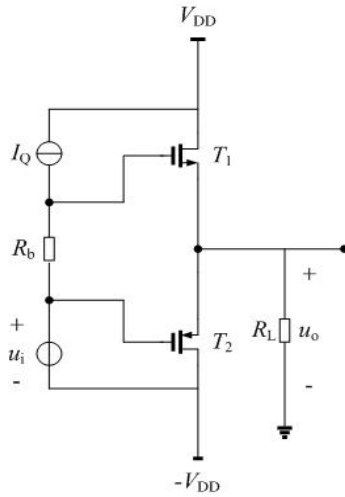
当理想条件下  $I_{cm}=I_{CQ}$  时，效率  $\eta$  最高，即  $\eta_{max}=50\%$ 。若考虑功率管有饱和压降  $V_{CE(sat)}$ ，实际最高效率为  $\eta_{max}=0.5(1-V_{CE(sat)}/V_{CC})^2$ 。

功率管管耗为  $P_T=P_D-P_o$ 。显然，最大管耗发生在静态，即  $P_o=0$  时，则  $P_{Tmax}=P_D$ 。在理想情况下，输出功率达到最大，即  $P_{omax}=I_{CQ}^2 R_L/2$ ，而  $P_D=2P_{omax}$ 。此时，最大管耗可表示为  $P_{Tmax}=P_{omax}$ ，而  $v_{CEmax}=2V_{CC}$ 。在设计 A 类功放时，这两个极限值是选择功率管的重要参数

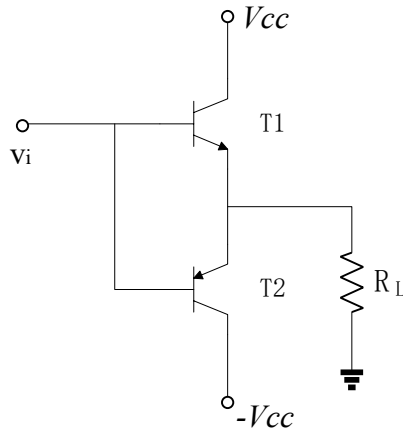
## 2.2 导通角及其他线性功率放大器

为了既不牺牲过多的线性度又能增加效率，提出了减小导通角的概念，即把晶体管的静态工作点降低，使输入射频信号仅在一个周期的部分时间开启晶体管。根据导通角大小，放大器的偏置从 AB 类到 B 类，最终到 C 类。

图 2.12.2(a)为集成互补 MOSFET B 类推挽功放原理电路，图 2.12.2(b)为 B 类双极性管推挽放大器原理电路，其中 T1 管为 NPN 型，T2 管为 PNP 型。两只功率管各放大半个周期，然后在负载上合成一个完整的正弦波。



(a) B类推挽MOS管功放电路



(b) B类推双极性晶体管管功放电路

图 2.12.2

以图 2.12.2(b)为例，忽略导通压降

$$i_{C1} = \begin{cases} I_{cm} \sin \omega t & 0 \leq \omega t \leq \pi, \\ 0 & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

$$i_{C2} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \omega t \leq \pi, \\ I_{cm} \sin \omega t & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

$$v_{CE1} = V_{CC} - V_{cm} \sin \omega t$$

$$v_{CE2} = -V_{CC} + V_{cm} \sin \omega t$$

所以通过负载  $R_L$  的电流为

$$i_L = i_{C1} + i_{C2} = I_{cm} \sin \omega t \quad (2-12-7)$$

响应产生的电压

$$v_L - V_{cm} \sin \omega t = R_L I_{cm} \sin \omega t \quad (2-12-8)$$

引入参数  $\xi$ ，称为电源电压利用系数，定义为

$$\xi = \frac{V_{cm}}{V_{CC}} \quad (2-12-9)$$

所以两管在负载上合成的输出信号功率为

$$P_L = \frac{1}{2} V_{cm} I_{cm} = \frac{1}{2} \frac{V_{cm}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \xi^2 \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \xi^2 P_{L \max} \quad (2-12-10)$$

$$\text{其中 } P_{L \max} = \frac{1}{2} \frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

对于幅度为  $I_{cm}$  的半周正弦波电流，其平均值  $I_{C0} = I_{cm}/\pi$ ，所以正负直流电源提供的总直流功率  $P_D$  为

$$P_D = P_{D1} + P_{D2} = 2V_{CC} \frac{I_{cm}}{\pi} = \frac{2}{\pi} \xi \frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{4}{\pi} \xi P_{Lmax} \quad (2-12-11)$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_D} = \frac{4}{\pi} \xi \quad (2-12-12)$$

A 类功放的导通角为 180 度。当导通角为 90 度时即为 B 类状态，此时，晶体管仅在输入信号的半个周期内导通，因此，功耗比 A 类小从而具有较高的效率。但是，B 类放大器由于信号失真，其线性度比 A 类差。如果即考虑线性度又兼顾效率，一个较好的选择是使放大器工作在 A 类和 B 类之间的区域，这样，既改善了 B 类的线性度又提高了 A 类的效率。因此，这种工作状态称为 AB 类，其晶体管导通时间小于一个信号周期而大于半个周期，导通角则大于 90 度而小于 180 度。由于 AB 类工作模式比 A 类工作效率高又比 B 类线性度好，因此常常用于既要求线性度又要求效率如 3G 移动通信中，也是线性微波单片集成功率放大器常用的工作状态。

当晶体管的导通时间小于半个周期或导通角小于 90 度时，这种状态被称为 C 类工作。C 类工作时具有更高的效率但信号幅度严重失真而不适合于线性应用，主要用于非线性应用情况，特别是仅仅利用相位来传送信息的恒包络调制方式的应用。

射频频功率放大器的效率  $\eta$  可以导通角  $\theta$  作为变量的函数关系来表示：

$$\eta = \frac{2\theta - \sin 2\theta}{4(\sin \theta - \theta \cos \theta)} \quad (2-12-13)$$

可计算出线性功放的效率如表 2.12.1 所示。

表 2.12.1 线性功率放大器工作状态及效率

工作类型	导通角 $\theta$	理论极限效率	实际工作效率
A	$\pi$	50%	30~40%
B	$\pi/2$	78.5%	40~55%
C	$<\pi/2$	$>90\%$	55~70%

### 3、开关射频功率放大器

为了使功率放大器具有高的效率甚至 100%，就要大大减小晶体管功耗直至为 0，于是出现了开关功率放大器。对于一个理想开关，其两端电压和流过的电流并不同时出现，因此，其直流功耗为 0。而开关功率放大器正是通过减少加在晶体管两端电压和流过的电流波形的交叠时间来提高效率的。其中最常见的开关射频功率放大器分为 D 类。

D 类功率放大器电路主要由开关管和滤波电路组成。滤波电路由谐振在基波频率的串联 LC 电路组成。理想情况下，D 类功放可达 100% 的效率。但是，由于开关管实际上具有从漏极或集电极到地的寄生电容，在工作频率很高时会使输出电压与电流波形发生变形并有交叠，因此其工作频率一般不宜过高。

## 三、实验内容

### 1、A 类射频功率放大器电路

#### (1) 电路结构

一个 A 类射频功率放大器电路如图 2.12.3 所示。根据电路原理图，选取相应的器件，构成实验电路。

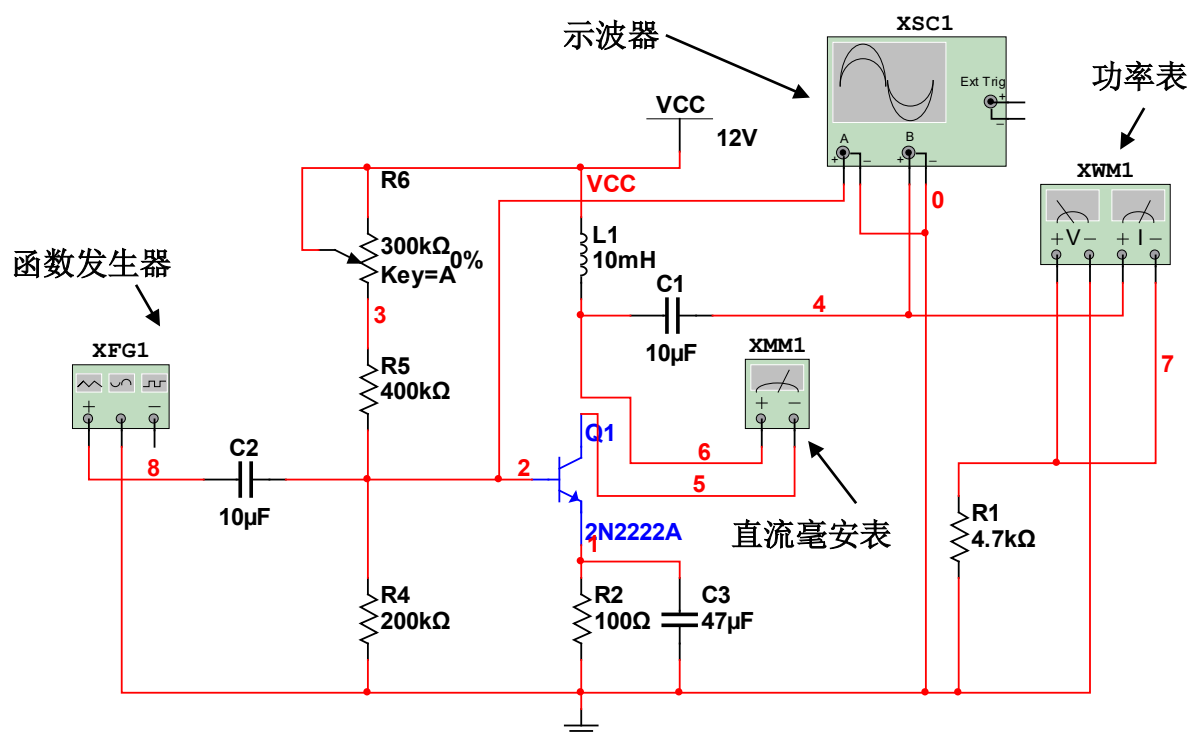


图 2.12.3 A类射频功率放大器实验电路

其中，函数发生器作为信号源；示波器显示输入输出波形；直流毫安表测量流过三极管集电极的直流电流，即静态工作点电流。功率表通过测量负载  $R_1$  上的电压以及流经  $R_1$  的电流，计算  $R_1$  所获得的功率  $P_o$ ，为有功功率

按下列步骤设置电路图参数：如图 2.12.4 所示，在菜单 view→toolbars 下在 Instrument 选项前打钩，调出相应的工具栏。

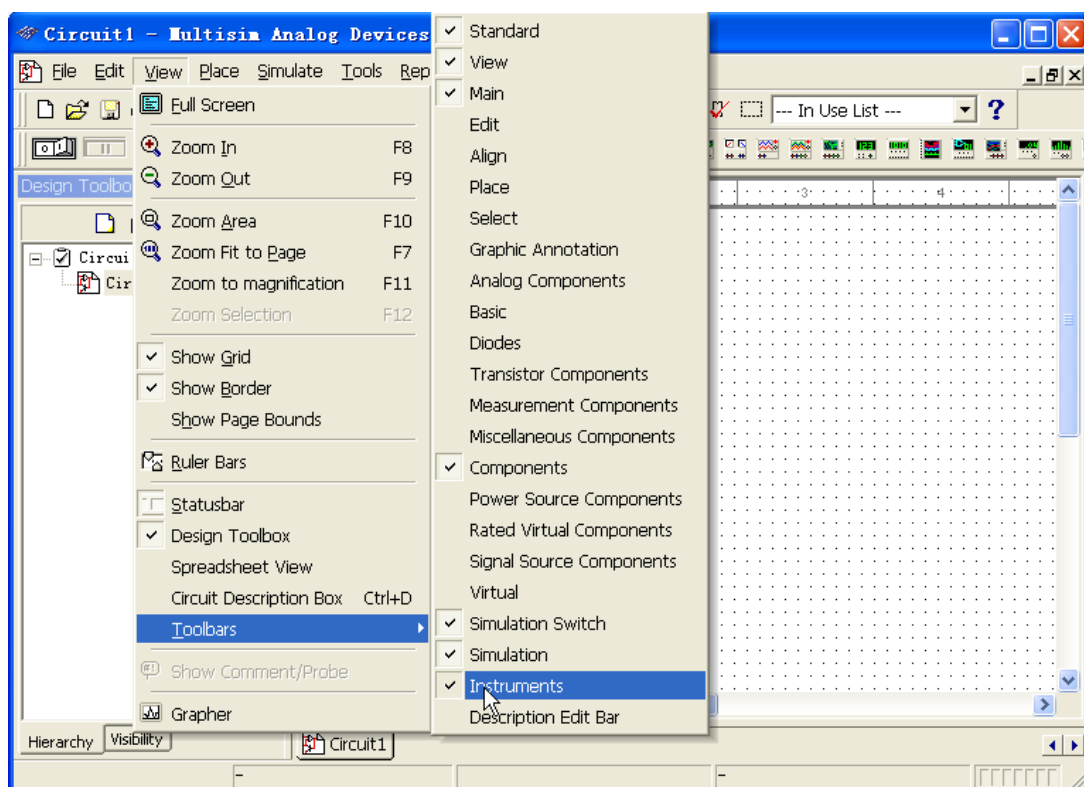


图 2.12.4 Toolbars菜单

Instrument 工具栏中常用的仪器的位置如图 2.12.5 所示。从中选出毫伏/毫安表、功率表与示波器，按图 2.12.3 所示接好。

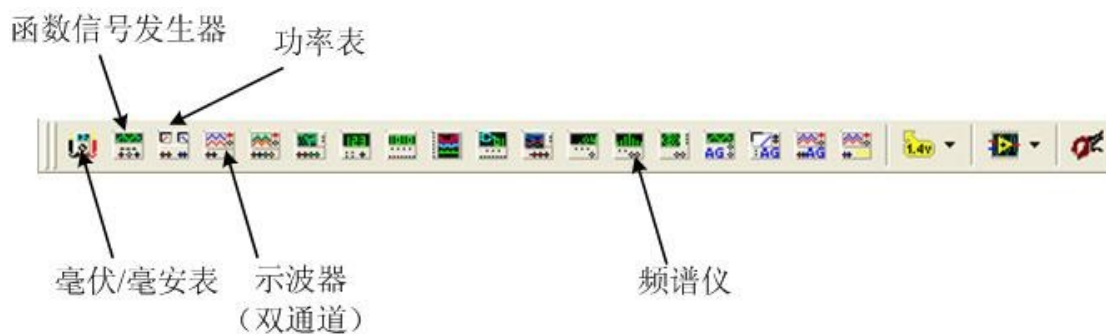


图 2.12.5 Instrument工具栏

双击毫伏/毫安表，按照图 2.12.6 设置即为直流毫安表。

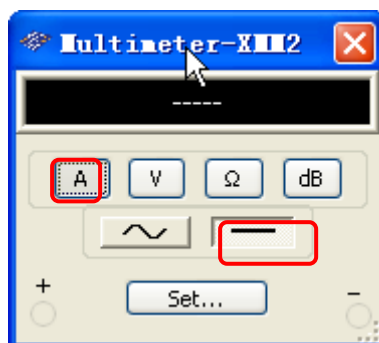


图2.12.6 毫伏/毫安表界面

如图 2.12.7，设置函数发生器的输入为 1MHz,幅值为 40mV 的正弦波

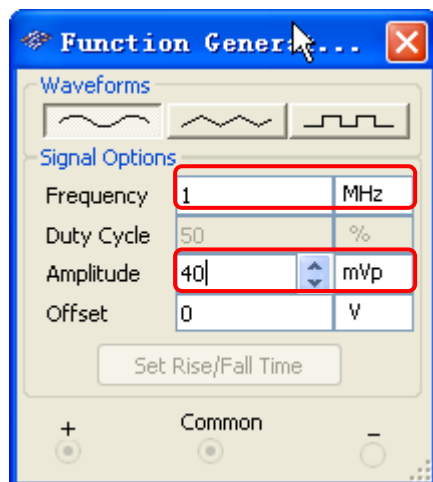


图2.12.7 正弦波函数信号设置对话框

## (2) 输出信号幅值的仿真

图 2.12.3 中的电路构建完成后，调整可变电阻的百分比（推荐调整到 70%），调整静态工作点，使输出波形不失真（若不能调整，适当降低输入电压幅值）。使得如图 2.12.8 所示按下 simulation switch 工具栏中的“Run”按钮，运行一段时间后，按下该工具栏最右边的“Stop simulation”按钮。观察示波器中双踪显示的输入输出信号的波形，以及毫安表和功率表中的相应的读数。



图2.12.8 simulation switch工具栏

## (3) 功放的效率计算

根据在直流毫伏表上观察到集电极的直流电流以及功率表上的输出功率，计算出功率放大器的效率。

## (4) 观察失真

将输入信号的幅值设为 60mV，Frequency 仍旧为 1MHz，观察此时电路输入输出波形与毫安表的输出。对比输入电压不同时，输出信号的失真情况,并分析可能的原因。

# 2、B 类射频功率放大器电路

## (1) 电路结构

一个 B 类射频功率放大器电路如图 2.12.9 所示。根据电路原理图，选取相应的器件，构成实验电路。

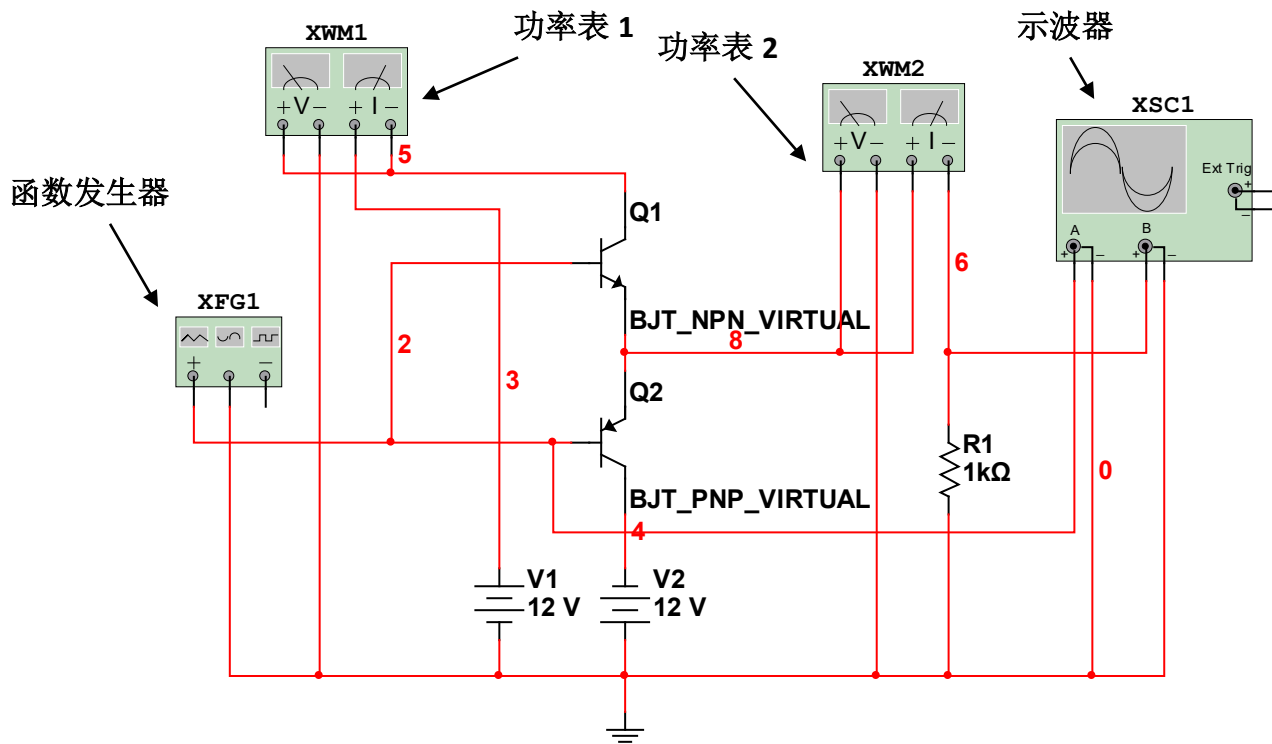


图 2.12.9 B 类射频功率放大器实验电路

其中，功率表 1 测量电源提供的单管直流功率  $P_D$ ，计算总直流功率时需乘以 2；功率表 2 测量负载所获得的输出功率  $P_o$ 。

按下列步骤设置电路图参数：设置函数发生器如图 2.12.10，1MHz,2V

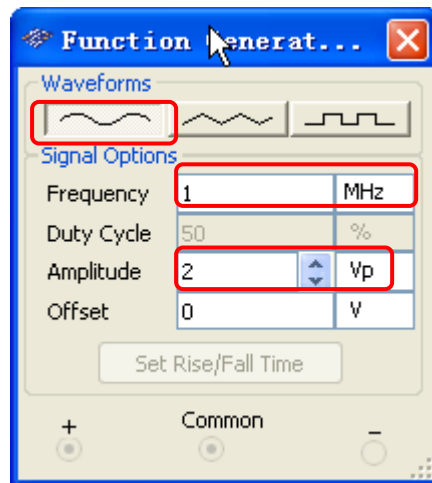


图 2.12.10 正弦波函数信号设置对话框

两个互补功率管选择如图 2.12.11，BJT\_NPN\_VIRTUAL 以及 BJT\_PNP\_VIRTUAL



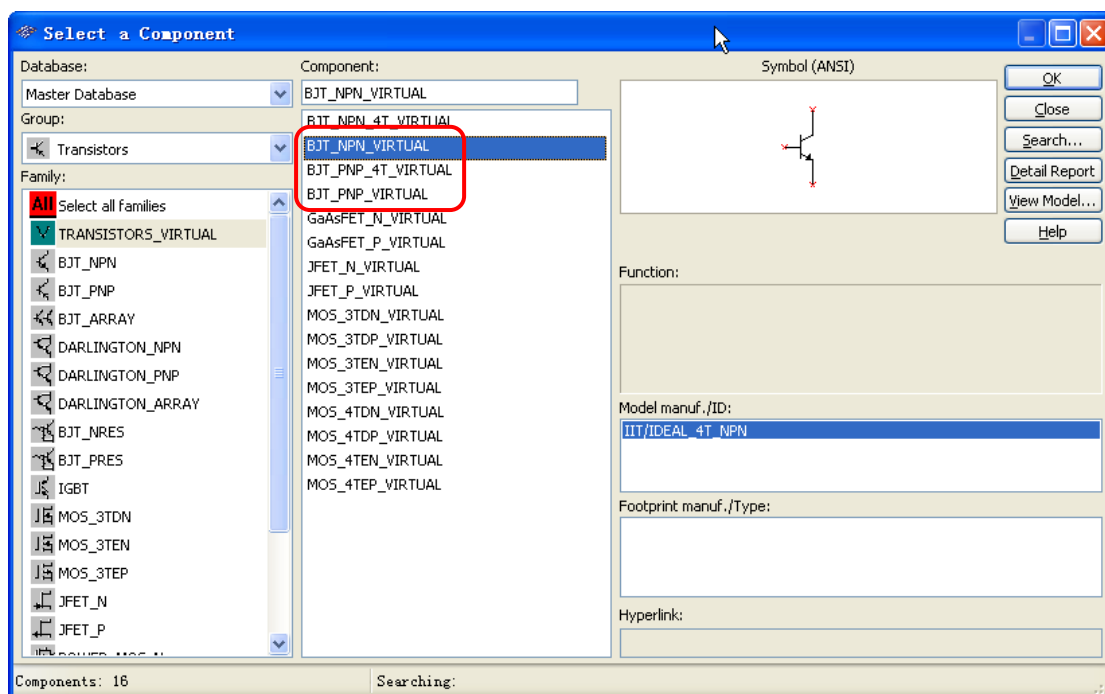


图 2.12.11 晶体管元件库

## (2) 输入输出信号波形的仿真

电路构建完成后，如图 2.12.8 所示按下 simulation switch 工具栏中的“Run”按钮，运行一段时间后，按下该工具栏最右边的“Stop simulation”按钮。观察示波器中显示的输入输出信号的波形，记录下输入输出信号的波形。并对波形的失真情况进行分析。加大输入信号的幅值至 8V，观察波形是否得到了改善，可能的原因是什么。

## (3) 消除交越失真

为消除失真，可以在每管的 B-E 间加合适的正向偏置电压，如图 2.12.12 所示。将函数发生去正弦波的幅值仍旧改回 2V，观察输出波形是否得到了改善。

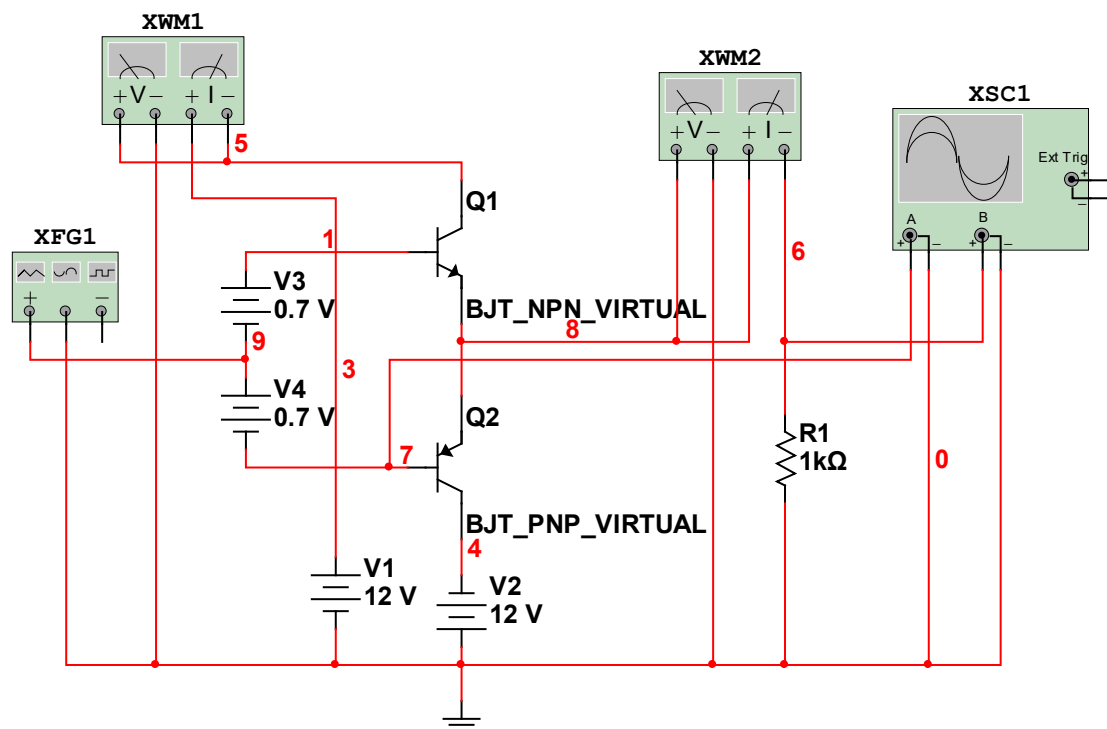


图 2.12.12 加入了正向偏置电压的实验电路

#### (4) 功放的效率计算（消除交越失真后）

如图 2.12.12 所示，在功率表上观察输入输出信号功率。调整输入信号的幅值，计算功放效率。（调整幅值时，用示波器监视输出波形，防止失真）。问：输入信号幅值能无限增大吗？功放效率最大为多少？两个管子的总耗散功率随着输入信号幅值的增大而不断增大吗？其最大值为多少？（注意，功率表测的是负载电阻的功率，另一个功率表测的是单个直流功率，计算时需乘以 2）

填写下表，并利用 MATLAB 由得到的点用平滑的曲线绘出两管管耗与电源电压利用系数的关系图。对其进行分析，回答上面提出的问题。

输入信号幅值 (V)	2	4	5	6	6.5	7
电源电压利用系数 $\xi$						
输出功率 $P_L$ (mW)						
总的直流功率 $P_D$ (mW)						
两管总耗散 $P_C$ (mW)						
效率 $\eta$						

输入信号幅值 (V)	8	9	10	12	13	14
电源电压利用系数 $\xi$						
输出功率 $P_L$ (mW)						
总的直流功率 $P_D$ (mW)						
两管总耗散 $P_C$ (mW)						
效率 $\eta$						

(注：输出波形失真时，表中对应项不填，列出失真波形即可。)

## 四、预习要求

熟悉射频功率放大器的工作原理与常见的实现结构,理解线性射频功率放大器与非线性射频功率放大器的电路工作原理与主要的电路参数的意义。

## 五、报告要求

- (1) 记录仿真获取的实验数据。
- (2) 对实验结果做一定的总结。

## 六、思考和分析：

(1) 上述 A 类功放设计时，推荐可变电阻调至 70%。能否进一步调整偏置电路（包括可变电阻外的其他电阻），使得获得更好的静态工作点，使得在输出波形不失真的情况下，获得更高的效率？

(2) 将 B 类功放中的 BJT 管换为相应的 MOS 管后，相关的仿真结果会产生哪些不同，并对原因做探讨。用 MOS 管设计 B 类功放比用 BJT 管有哪些优点？

(3) 在上述 B 类功放中采用了双电源供电电路，若采用单电源供电，如何实现，会有什么不同？

## 七、实验仪器与器材