

浙江大学实验报告

专业：微电子科学与工程

姓名：wcHikaru

学号：/

日期：2025 年 12 月 9 日

地点：东四 216

课程名称：电子电路设计实验 I

指导老师：施红军、叶险峰、邓婧婧 成绩：

实验名称：晶体管共射放大电路的设计、仿真与测试

实验类型：设计型实验

同组学生姓名：/

一、实验目的

- (1) 学习晶体管放大电路的设计方法。
- (2) 掌握晶体管放大电路静态工作点的设置、测量与调整方法。
- (3) 了解放大器的非线性失真。
- (4) 掌握放大器电压增益、输入电阻、输出电阻、幅频响应等基本性能指标的测量方法。
- (5) 理解负反馈对放大电路性能的影响。

二、实验任务与要求

- (1) 设计一阻容耦合单级放大电路，指标如下：

已知条件： $V_{CC} = +10\text{ V}$ ， $R_L = 5.1\text{ k}\Omega$ ， $V_i = 10\text{ mV}$ ， $R_S = 600\Omega$ 。性能指标要求： $f_L < 50\text{ Hz}$ ，对频率为 2 kHz 的正弦信号 $|A_v| > 15\text{ V/V}$ ， $R_i > 3\text{ k}\Omega$

根据该指标，用给定电路结构设计电路，并进行仿真。

- (2) 对电路进行验算，将验算结果与仿真结果比较。

- (3) 进行波形测量，与仿真值进行比较。

- (4) 探索研究以下内容

- 改变 R_{E1} 的大小探究对放大器增益的影响。
- 改变 C_E 的大小探究放大器下限截止频率的变化；
- 探究静态工作点对放大器动态范围的影响；
- 在晶体管的 B、C 间接入一瓷片电容（数百 pF），分析对放大器什么性能产生影响，探究电容的大小对该性能的影响。

三、实验原理

1. 晶体管共射放大电路电路原理图

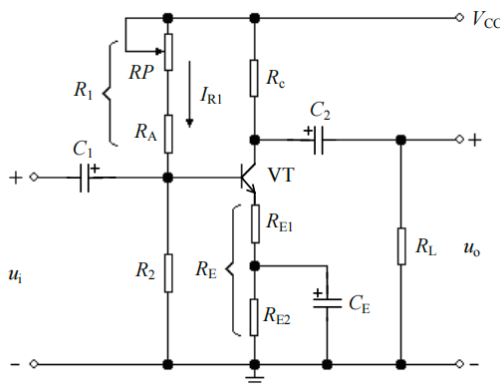


Figure 1: 带射极负反馈的共射放大电路电路图

图 1 所示为分立电路中普遍采用的阻容耦合共射放大电路。它采用的是分压式电流负反馈偏置电路。射极电阻 R_{E1} 、 R_{E2} 都参与了直流电流负反馈, 但只有 R_{E1} 参与交流电流负反馈, 因为旁路电容 C_E 交流时可认为短路。 R_{b1} 、 R_{b2} 提供静态工作点所需基极电压。 R_{W1} 进行静态工作点的调节; R_{b1} 保护电路, 避免 R_{W1} 调至 0 时基极电流过大, 损坏 BJT; R_C 为直流负载电阻, R_L 为交流负载电阻, C_b 、 C_c 为耦合电容。

2. 静态工作点计算

图 1 所示电路的直流通路如图 2 所示。该电路的近似计算通常假设 $I_{R1} \gg I_B$, 求得 V_B 、 V_E , 进而求得 I_E 、 I_C 和 V_{CE} 。但这种估算有时候误差很大。实际上只需对这电路进行简单的戴维宁等效(如图 3)就可计算出准确得多的直流结果。

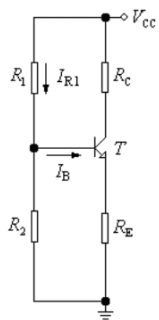


Figure 2: 直流通路

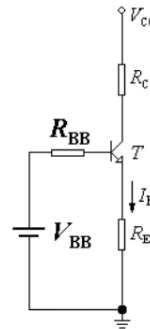


Figure 3: 直流通路的戴维南等效电路

由戴维南等效可得静态工作点:

$$\begin{cases} V_{BB} = V_{CC} \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \\ R_{BB} = R_{B1} \parallel R_{b2} \\ I_C = \frac{\beta}{1+\beta} I_B \approx I_E \\ V_{CE} \approx V_{CC} - (R_C + r_{be}) I_C \\ I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{r_{be} + \frac{R_{BB}}{1+\beta}} \end{cases}$$

3. 交流分析

图 1 所示电路的交流等效电路分析中, 晶体管的小信号参数为:

$$\begin{cases} g_m = \frac{I_C}{V_T} \\ r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \\ r_e = \frac{\alpha}{g_m} \end{cases}$$

其中 $V_T \approx 26 \text{ mV}$ (室温下)。交流等效电路如图 4 所示。

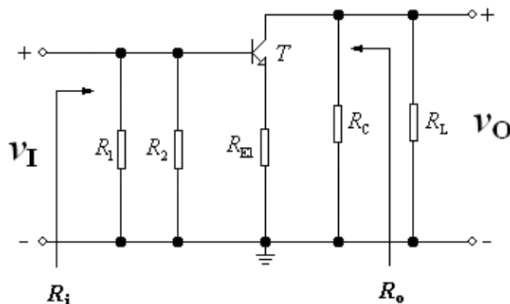


Figure 4: 交流等效电路

此时, 有:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx - \frac{\text{集电极总电阻}}{\text{发射极总电阻}} = - \frac{R'_C}{R'_E} = - \frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}}$$

$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1 + \beta)(r_e + R_{E1})]$$

$$R_o \approx R_C$$

4. 频率响应

通频带定义为:

$$BW = f_H - f_L$$

其中, f_H 为上限截止频率, 主要受晶体管内部结电容 (米勒电容) 及电路的分布电容限制; f_L 为下限截止频率, 主要受射极旁路电容 C_E 及耦合电容 C_1 、 C_2 影响。

要严格计算电容 C_1 、 C_2 及 C_E 同时存在对放大器低频特性的影响较为复杂。工程上常用短路时间常数法进行简化计算。先求出每个电容单独存在时的转折频率 ω_{C1} 、 ω_{C2} 、和 ω_{CE} , 则这些电容同时存在时的下限截止频率为:

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\omega_{C1}^2 + \omega_{C2}^2 + \omega_{CE}^2}$$

计算每个电容单独作用的短路时间常数时, 令其他电容短路, 信号电压源也短路, 可以得到:

$$\omega_{C1} = \frac{1}{(R_S + R_i)C_1}$$

$$\omega_{C2} = \frac{1}{(R_C + R_L)C_2}$$

$$\omega_{CE} = \frac{1}{[R_{E2} \parallel (R_{E1} + r_e + \frac{R_S \parallel R_1 \parallel R_2}{1 + \beta})]C_E}$$

通常, 旁路电容 C_E 的输入等效电阻比耦合电容 C_1 、 C_2 的输入等效电阻小得多。因此, 当这三个电容值相当时, 整个电路下限截止频率 f_L 主要由旁路电容 C_E 引入的转折频率决定。

5. 静态工作点失真

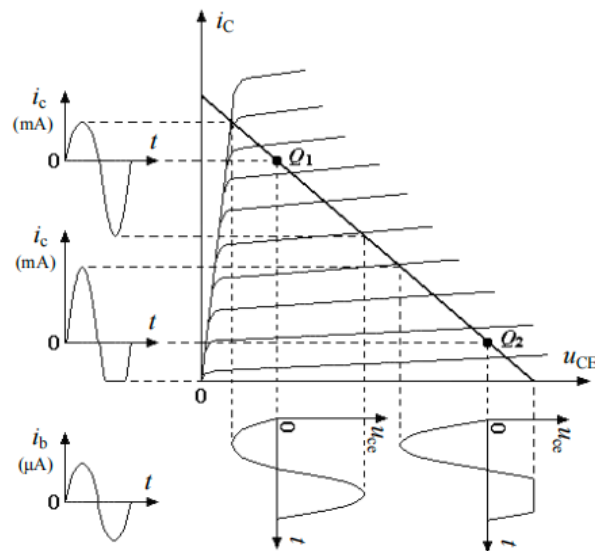


Figure 5: 静态工作点选取不当产生的非线性失真

静态工作点 (Q 点) 的选择直接决定了放大电路的线性度与动态范围。Q 点设置不当是产生非线性失真的主要原因。根据 Q 点位置的不同, 非线性失真主要分为以下两类:

- 饱和失真 当 Q 点选得过高时 (如 Q_1 点)

在输入信号较大的正半周, 晶体管容易进入饱和区。此时集电极电流 i_C 波形的顶部将被压缩, 导致输出电压 v_{CE} 波形的底部出现压缩现象。

• 截止失真 当 Q 点选得过低时 (如 Q_2 点)

在输入信号较大的负半周, 晶体管容易进入截止区。此时集电极电流 i_C 波形的底部将被削平, 导致输出电压 v_{CE} 波形的顶部出现削平现象。

为了实现不失真放大并获得最大的输出动态范围, 应合理设置静态工作点。通常选取直流负载线的中点, 即设定:

$$V_{CE} \approx 0.5V_{CC}$$

可获得较大的输出动态范围。

四、实验方案设计与参数计算

已知条件: $V_{CC} = +10\text{ V}$, $R_L = 5.1\text{ k}\Omega$, $V_i = 10\text{ mV}$, $R_S = 600\Omega$ 。性能指标要求: $f_L < 50\text{ Hz}$, 对频率为 2 kHz 的正弦信号 $|A_v| > 15\text{ V/V}$, $R_i > 3\text{ k}\Omega$ 。

根据上述条件与要求确定电路参数如下:

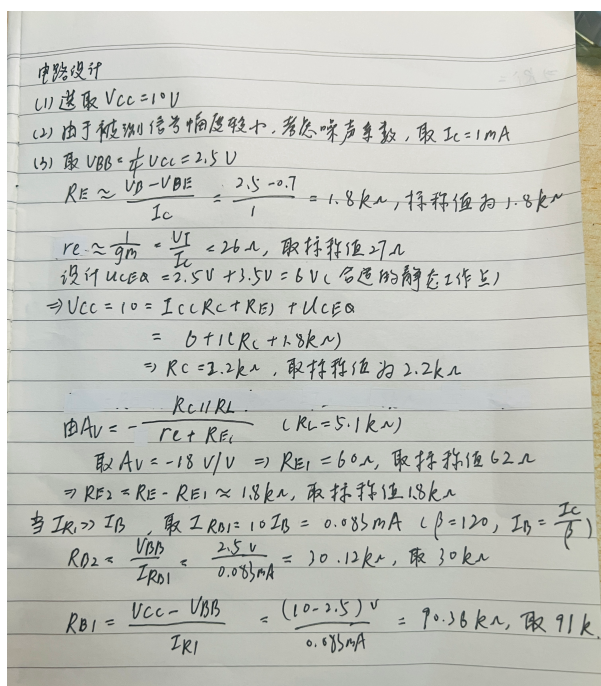


Figure 6: 手写电路设计参数 (1)

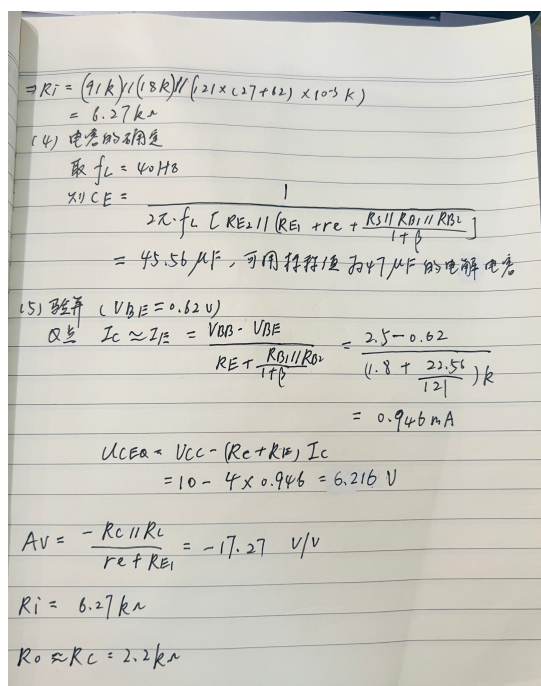


Figure 7: 手写电路设计参数 (2)

五、实验电路仿真

按照参数设定, 绘制电路图, 如下图所示。

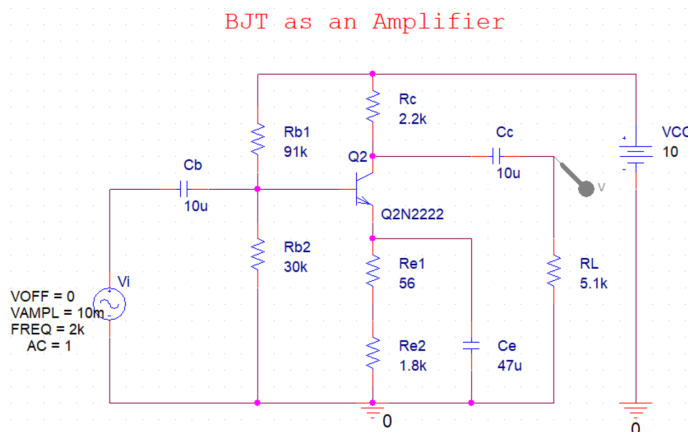


Figure 8: 仿真电路图

修改 Q2N2222 的模型参数 $\beta = 120$, 使其符合实验要求。

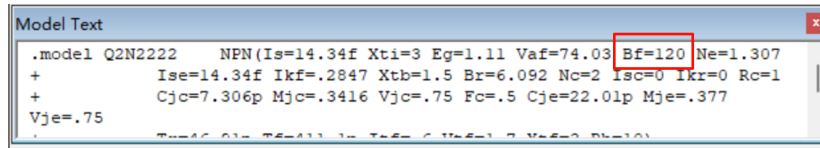


Figure 9: 修改后的晶体管模型参数

1. 静态工作点仿真

通过直流偏置点仿真, 得出静态工作点。

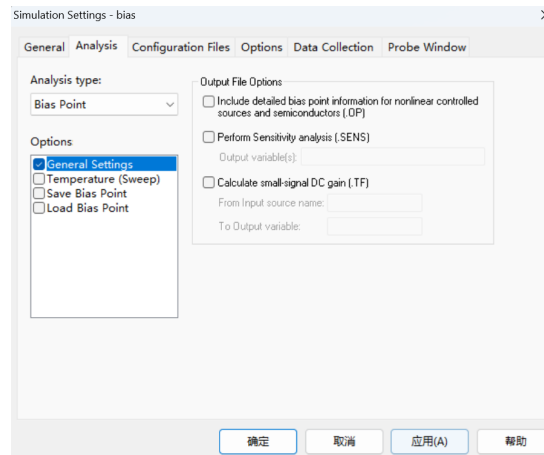


Figure 10: Bias Point 设置参数

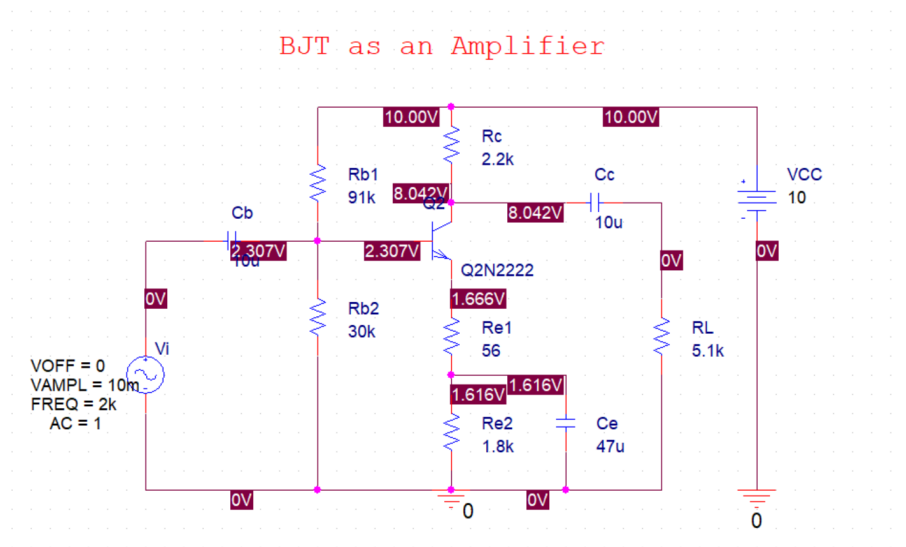


Figure 11: 静态工作点仿真结果

根据仿真结果, 得到静态工作点参数如下:

$$\begin{cases} I_C = \frac{10.00 - 8.042 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega} = 0.890 \text{ mA} \\ V_{CE} = 8.042 - 1.666 = 6.376 \text{ V} \\ V_{BE} = 2.307 - 1.666 = 0.641 \text{ V} \end{cases}$$

2. 交流分析

先进行瞬态分析, 设置时长为 1ms (两个周期) 观察输入输出波形。

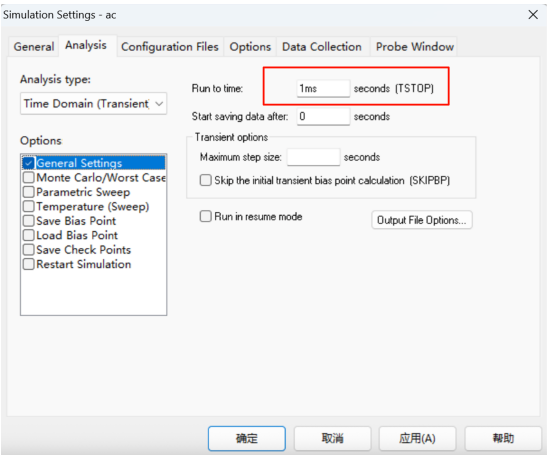


Figure 12: 瞬态分析设置参数

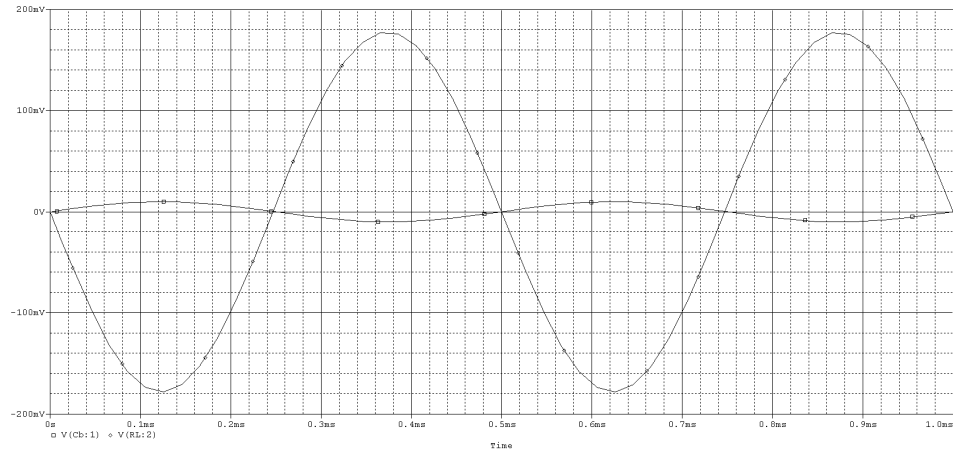


Figure 13: 瞬态分析仿真结果

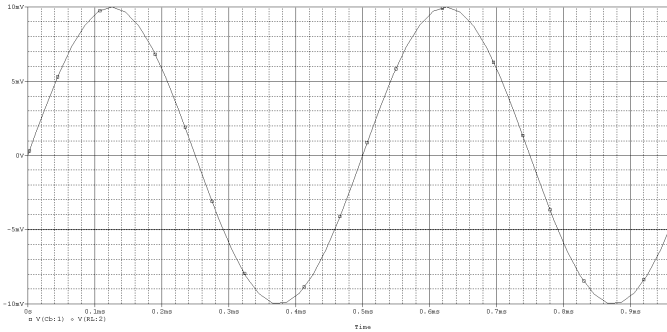


Figure 14: 输入波形放大效果

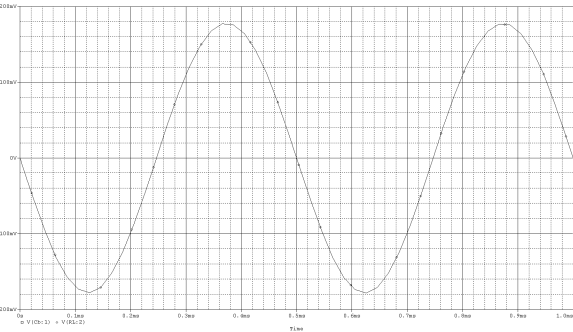


Figure 15: 输出波形放大效果

- 2.1) A_v
- 2.1.1) $R_L = 5.1\text{ k}\Omega$

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1)	Y2(Cursor2)	-9.946m		
	X Values	375.472u	0.000	375.472u	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
	V(Cb:1)	-9.921m	25.133u	-9.946m	0.000	0.000	25.133u	-9.921m	-4.9479m
	V(RL:2)	176.302m	0.000	176.302m	186.223m	-25.133u	176.302m	0.000	88.151m

Figure 16: 光标仿真结果

根据光标测量，输入幅值为 9.921 mV，输出幅值约为 176.302 mV，则电压增益为：

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-176.302\text{ mV}}{9.921\text{ mV}} \approx -17.77\text{ V/V}$$

这与验算值 $A_v = -17.27 \text{ V/V}$ 非常接近, 误差较小。

2.1.2) 空载, $R_L = \infty$

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	-19.722m		
	X Values	359.259u	126.543u	232.716u		Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
CURSOR 1,2	V(Cb:1)	-9.738m	9.984m	-19.722m	0.000	0.000	0.000	9.984m	-9.738m	123.000u
	V(Rc:1)	8.3309	7.8336	497.300m	8.3406	7.8236		8.3309	7.8336	8.0823
	MAX(V(Rc:1))	8.3352	8.3352	0.000	8.3449	8.3252		8.3352	8.3352	8.3352
	MAX(V(Cb:1))	10.000m	10.000m	0.000	19.738m	16.000u		10.000m	10.000m	10.000m

Figure 17: 光标仿真结果

根据光标测量, 输入幅值为 10 mV , 输出幅值约为 $8.3309 - 8.0823 = 0.2486 \text{ V}$, 则电压增益为:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-248.6 \text{ mV}}{10 \text{ mV}} \approx -24.86 \text{ V/V}$$

空载时的电压增益大于带负载时的电压增益, 符合预期。

2.2) R_{in}

在信号源与被测放大器之间串入一个与 R 同一数量级(理论估算)的已知电阻 R , 在输出波形不失真的情况下, 分别测出 v_s 和 v_i , 则放大器的输入电阻为

$$R_i = \frac{v_i}{(v_s - v_i)/R} = \frac{v_i}{v_s - v_i} \times R$$

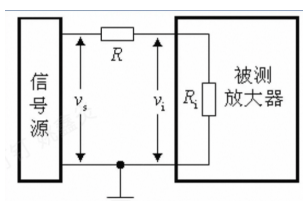


Figure 18: 仿真输入电阻原理图

根据该原理图绘制电路图如下

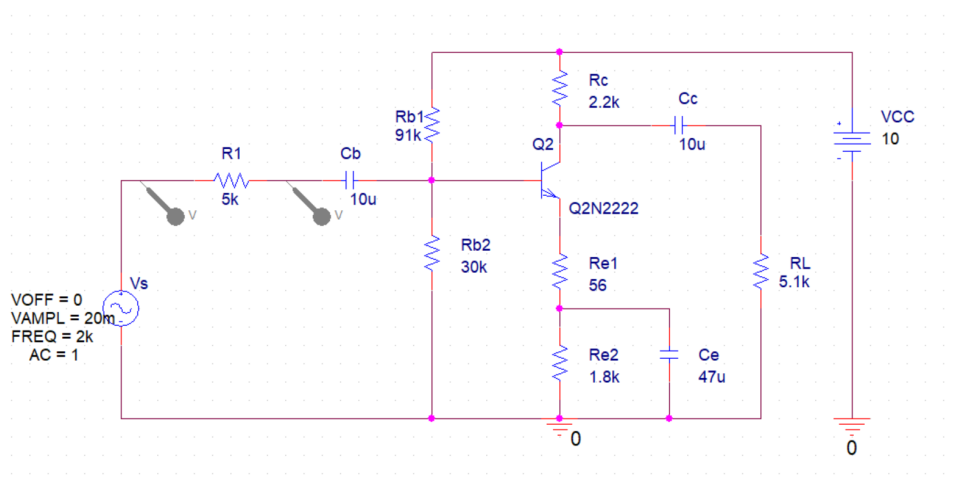


Figure 19: 输入电阻仿真电路图

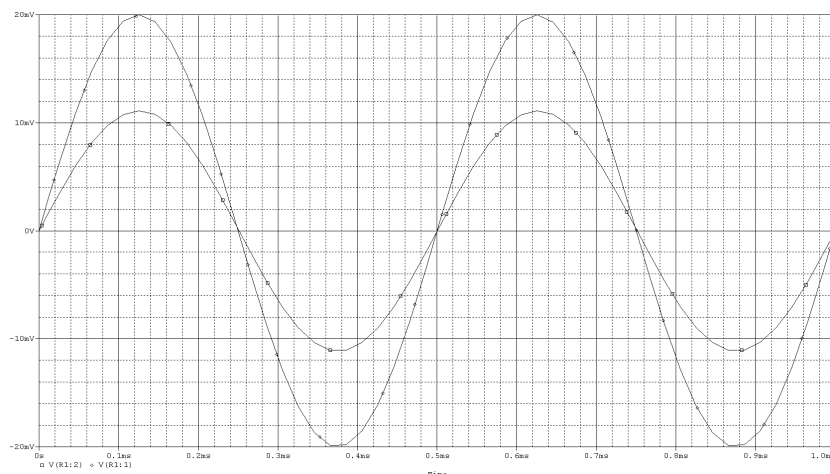


Figure 20: 输出仿真波形

选择同一 x 值, 光标测量如下

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	0.000		
	X Values	125.000u	125.000u	0.000	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y
CURSOR 1,2	V(R1:2)	11.094m	11.094m	0.000	0.000	0.000	11.094m	11.094m
	V(R1:1)	19.982m	19.982m	0.000	8.8880m	8.8880m	19.982m	19.982m

Figure 21: 光标测量

根据光标测量, $v_s = 19.982 \text{ mV}$, $v_i = 11.094 \text{ mV}$, 选取 $R = 5 \text{ k}$, 则输入电阻为:

$$R_i = \frac{v_i}{(v_s - v_i)/R} = \frac{v_i}{v_s - v_i} \times R = \frac{11.094 \text{ mV}}{19.982 \text{ mV} - 11.094 \text{ mV}} \times 5 \text{ k}\Omega = \frac{11.094 \text{ mV}}{8.888 \text{ mV}} \times 5 \text{ k}\Omega \approx 6.25 \text{ k}\Omega$$

这与验算值 $R_i = 6.27 \text{ k}\Omega$ 非常接近, 误差较小。

2.3) R_{out}

在输出波形不失真情况下, 分别测出输出端空载时的输出电压 v_o 和接入负载 R_L 后的输出电压 v'_o , 则放大器的输出电阻为

$$R_o = \frac{v_o - v'_o}{v'_o/R_L} = \left(\frac{v_o}{v'_o} - 1 \right) \times R_L$$

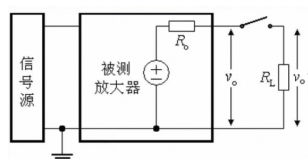


Figure 22: 仿真输出电阻原理图

因此, 可以根据上述 A_v 分析中空载时的输出电压和接入负载 R_L 时的输出电压来计算输出电阻。

$$R_o = \frac{v_o - v'_o}{v'_o/R_L} = \left(\frac{v_o}{v'_o} - 1 \right) \times R_L = \left(\frac{248.6 \text{ mV}}{176.302 \text{ mV}} - 1 \right) \times 5.1 \text{ k}\Omega \approx 2.1 \text{ k}\Omega$$

这与验算值 $R_o = 2.2 \text{ k}\Omega$ 非常接近, 误差较小。

2.4) 频率响应仿真

在电路图中添加电容 C_u , 并设置频率扫描参数进行交流分析仿真。

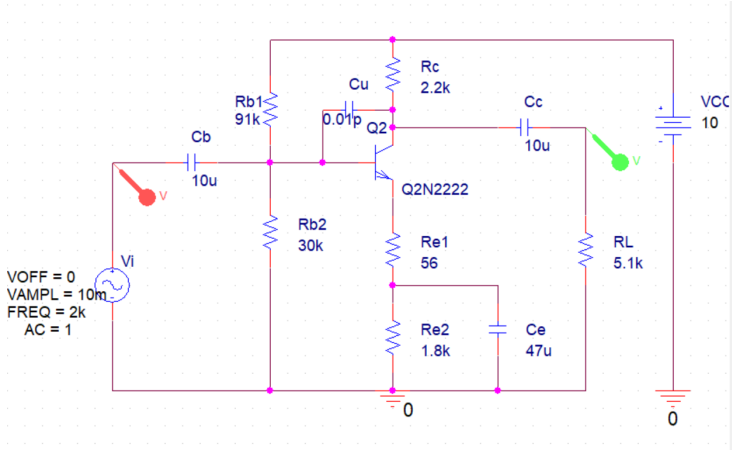


Figure 23: 频率响应分析电路图

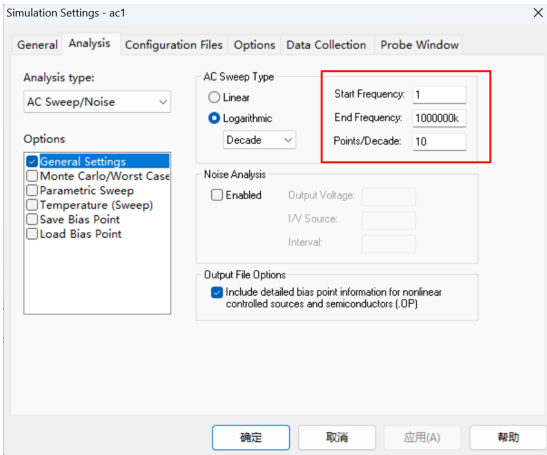


Figure 24: 交流分析设置参数

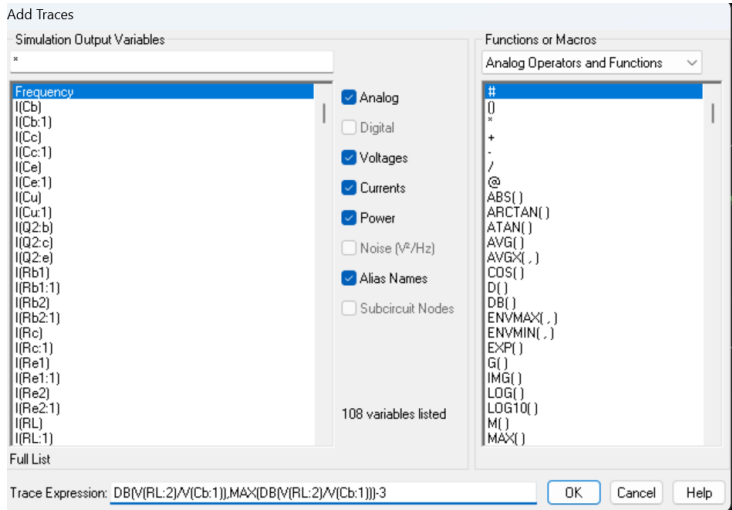


Figure 25: 添加 Trace

添加 Trace:DB(V(RL:2)/V(Cb:1)), MAX(DB(V(RL:2)/V(Cb:1)))-3.得到仿真波特图和上下限截止频率。

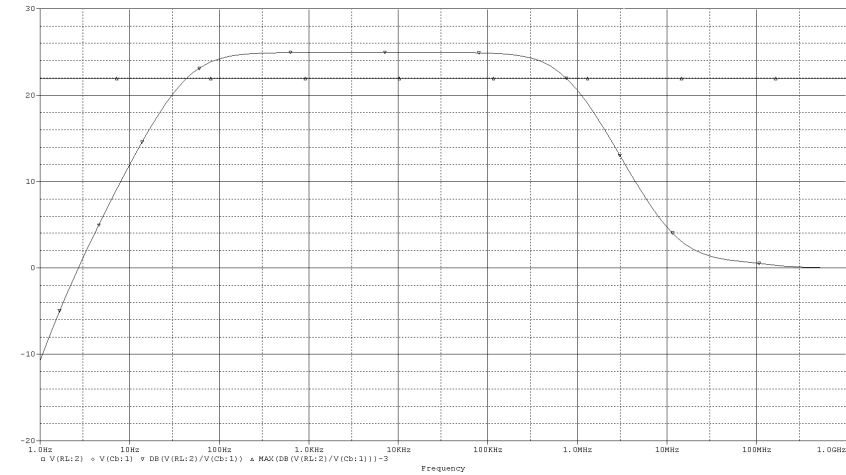


Figure 26: 仿真波特图

2.4.1) $C_u = 0.01\text{ pf}$

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	-423.000m			
X Values		40.323	24.800M	-24.800M	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
	DB(V(RL2)/V(Cb1))	21.719	22.142	-423.000m	0.000	0.000	22.142	21.719	21.931
	MAX(DB(V(RL2)/V(Cb1)))-3	22.023	22.023	0.000	304.000m	-119.000m	22.023	22.023	22.023

Figure 27: 光标查看

查看光标可得

$$f_L \approx 40.323\text{ Hz}$$

$$f_H \approx 24.800\text{ MHz}$$

$$BW = f_H - f_L = 24.800\text{ MHz} - 40.323\text{ Hz} = 24.759\text{ MHz}$$

2.4.2) $C_u = 104\text{ pf}$

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	55.000m			
X Values		42.987	987.289K	-987.246K	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
	DB(V(RL2)/V(Cb1))	21.901	21.846	55.000m	0.000	0.000	21.901	21.846	21.874
	MAX(DB(V(RL2)/V(Cb1)))-3	21.941	21.941	0.000	40.000m	95.000m	21.941	21.941	21.941

Figure 28: 光标查看

查看光标可得

$$f_L \approx 42.967\text{ Hz}$$

$$f_H \approx 987.289\text{ KHz}$$

$$BW = f_H - f_L = 987.289\text{ KHz} - 42.967\text{ Hz} = 987.246\text{ KHz}$$

2.4.3) $C_u = 104 + 30 = 134\text{ pf}$

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2	Y1(Cursor1) - Y2(Cursor2)	-30.000m			
X Values		43.540	745.113K	-745.070K	Y1 - Y1(Cursor1)	Y2 - Y2(Cursor2)	Max Y	Min Y	Avg Y
	DB(V(RL2)/V(Cb1))	21.954	21.984	-30.000m	0.000	0.000	21.984	21.954	21.969
	MAX(DB(V(RL2)/V(Cb1)))-3	21.941	21.941	0.000	-13.000m	-43.000m	21.941	21.941	21.941

Figure 29: 光标查看

查看光标可得

$$f_L \approx 43.54\text{ Hz}$$

$$f_H \approx 745.113\text{ KHz}$$

$$BW = f_H - f_L = 745.113\text{ KHz} - 43.54\text{ Hz} = 745.07\text{ KHz}$$

可知随着 C_u 的增大, 上限截止频率 f_H 逐渐降低, 而下限截止频率 f_L 变化不大, 符合预期。

六、 实验仪器设备

电路板、示波器、信号发生器、万用表、直流稳压电源

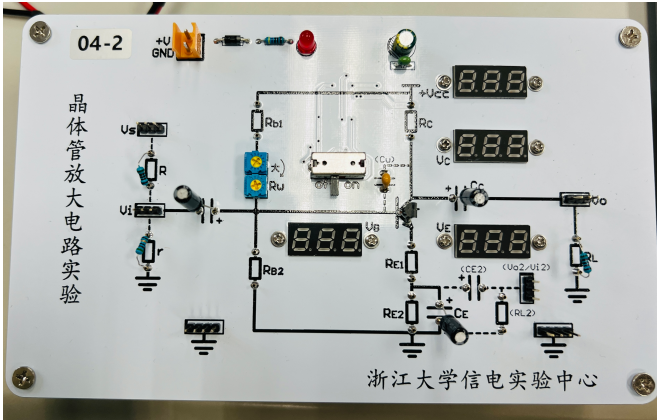


Figure 30: 实验电路平台

七、 晶体管共射放大电路测试步骤、实验数据记录

1. 静态工作点的调整和测量

- (1) 按电阻电容预设值安装电路, 注意电容极性, C_u 先不插。
- (2) 调整直流稳压电源输出为恰当值, 关闭电源后与电路板直流电源输入接线端子相连接, 打开直流稳压电源。
- (3) 将机械开关切换到 ON, 从四个数字品示电压表头可以实时观察到直流供电电压 V_{cc} 和晶体管的基极、集电极、和发射极静态工作电压。再次调整稳压电源输出电压, 使 V_{cc} 为预设值。
- (4) 调整 R_w , 可以观察到晶体管基极、集电极、和发射极电压的协同变化情况, 了解晶体管三个电极间信号的相位关系, 并掌握铄嘴品裘体管在饱和区和截止区工作时, 各电极之间电压差的大致范围。
- (5) 不加输入信号。调整 R_w 使 I_c 为设计值。

测得静态工作点参数如下：

mA、V	I_C	V_{CE}	V_{BE}	V_B
理论估算	1.00	4.818	0.618	2.5
测量	1.003	4.8	0.64	2.53

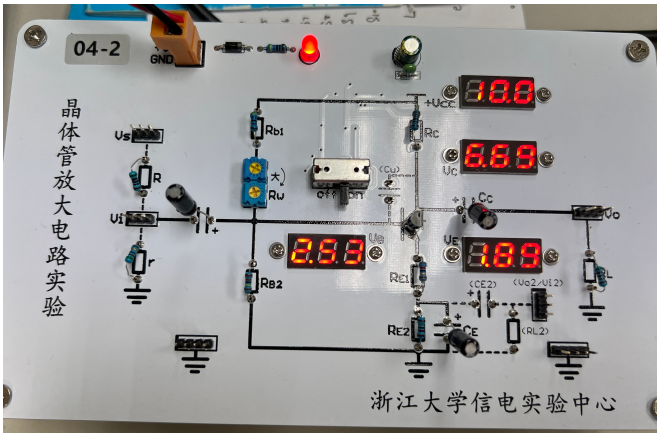


Figure 31: Q 点测量

2. 电压增益测量

- (1) 保持 I_C 不变, 调节信号源, 使输出 2kHz 正弦波, 加至放大电路输入端, 使输入电压 v_i 幅度 10mV (示波器显示为准)。输入、输出波形用双踪显示观察, 指出它们的相位关系。不接入负载电阻, 即 $R_L = \infty$ 。当输出波形无失真时, 分别读出 v_i 、 v_o 的峰-峰值, 记入下表。拔出电容 C_E , 再次读出 v_o 的峰-峰值并记录。
- (2) 恢复电容 C_E 插入状态, 逐渐增大输入信号幅度, 用示波器监视输出波形, 使输出波形出现失真, 记下此时输出波形草图, 说明首先出现的是哪种失真。测出最大不失真输出电压峰-峰值, 记入下表。
- (3) 接入负载 R_L , 读出 v_o 的峰-峰值并记录。计算电压增益 A_v , 分析负载对电压增益的影响。

测试条件	实测值				理论值 $ A_v $
	V_{iP-P}	V_{oP-P}	$V_{oP-Pmax}$	$ A_v $	
$R_L = \infty$, 有 C_E	19.514mV	549.42mV	4.6968V	27.471	29.527
$R_L = \infty$, 无 C_E	19.514mV	34.245mV	×	1.755	/
R_L (5.1k Ω) 有 C_E	19.514mV	352mV	×	18.038	15.427

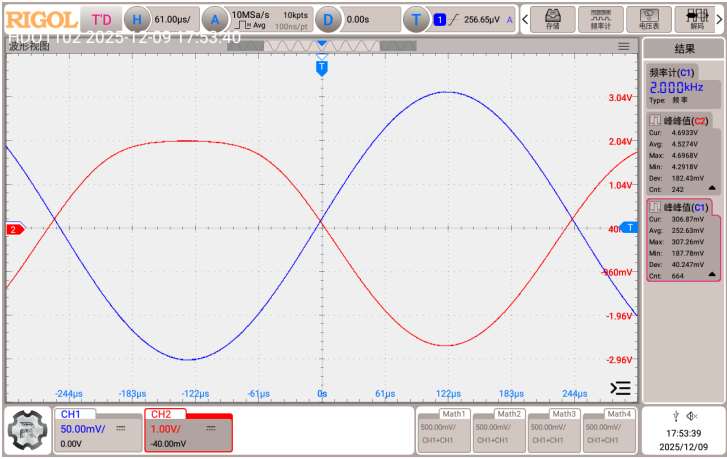


Figure 32: 出现饱和和失真

3. 输入电阻测量

根据仿真部分所述输入电阻测量原理, 测量输入电阻。

R_i (理论)	R	v_s	v_i	R_i (实际)
8.88k Ω	5.1k Ω	20.101mV	12.75mV	8.845k Ω

4. 输出电阻测量

根据仿真部分所述输出电阻测量原理, 测量输出电阻。

R_o (理论)	R	v'_o	v_o	R_o (实际)
3.267k Ω	5.1k Ω	352mV	549.42mV	2.86k Ω

5. 上限截止频率 f_H 、下限截止频率 f_L 测量

- (1) 在 I_C 为设计值、 $R_L = 5.1\text{ k}\Omega$ 情况下, 输入 v_i 频率 2kHz、幅度 10mV 正弦信号, 读出并记录输出电压峰-峰值 V_{Op-p} , 计算 $0.707V_{Op-p}$ 。
- (2) 保持输入信号 v_i 幅度不变, 改变信号源输出频率 (增加或减小), 当输出电压值达到 $0.707V_{Op-p}$ 值时, 停止信号源频率的改变, 此时信号源所对应的输出频率即为 f_H 、或 f_L 。
- (3) 插入电容 $C_u = 30\text{pF}$, 测量并记录上限截止频率 $f_{H(C_u)}$ 。

测试条件	$V_{\text{O-p-p}}$	$0.707V_{\text{O-p-p}}$	f_L	f_H
无 C_u	352mV	249.076mV	38Hz	740kHz
$C_u = 30 \text{ pF}$	352mV	249.076mV	38Hz	550kHz

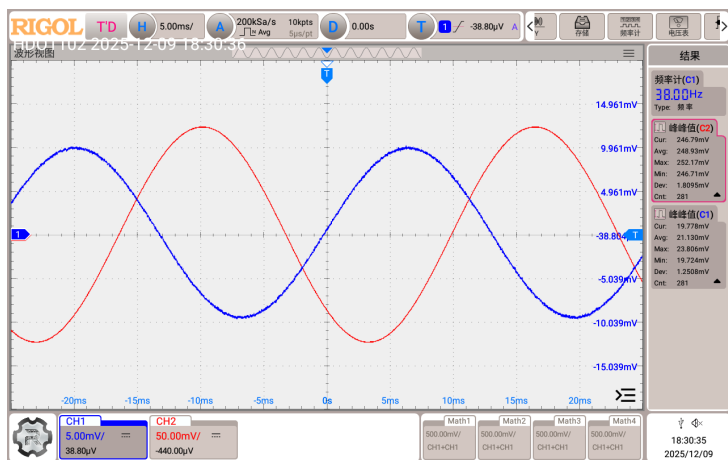


Figure 33: 下限截止频率测量

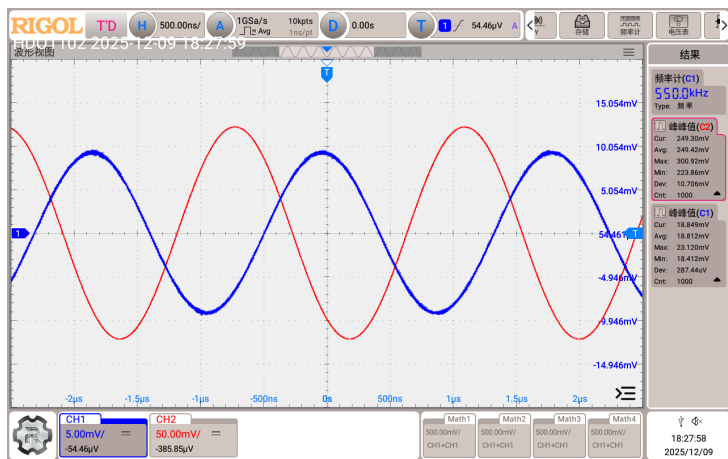


Figure 34: 存在 Cu 时的上限截止频率测量

八、心得体会

本次晶体管共射放大电路的实验是一个从理论计算、软件仿真到硬件实现的完整工程训练过程，让我对模拟电路的设计与调试有了更深刻的理解。

首先,在静态工作点(Q点)的设计与调试中,我深刻体会到了“牵一发而动全身”的特点。理论计算时, R_{b1} 和 R_{b2} 的取值直接决定了基极电位,进而锁定 I_C 和 V_{CE} 。在实测中,我发现实际元件参数与标称值存在偏差,导致实测Q点与设计值略有出入(实测 $I_C \approx 1.003mA$),这教会了我在工程实践中必须学会使用电位器 R_P 进行微调,以确保晶体管工作在放大区中心,增大输出电压摆幅避免饱和或截止失真。

其次,在动态性能测试中,我对“负反馈”和“频率响应”有了直观的认识。仿真与实测结果均表明,接入射极旁路电容 C_E 后,交流信号被短路,负反馈减弱,电压增益显著提升(从无 C_E 时的 1.7 倍提升至约 18 倍);但也带来了通频带的变化。特别是在探究米勒效应时,我在 B-C 间接入 $30pF$ 电容,明显观察到上限截止频率 f_H 从 $740kHz$ 下降至 $550kHz$,验证了级间电容对高频特性的限制作用。

此外,对比仿真与实测数据,我发现了二者存在的一致性与差异性。电压增益 A_v 的吻合度较高,但输入电阻 R_i 的实测值(约 $8.8\text{k}\Omega$)比理论值偏大。经分析,这可能与晶体管实际 β 值的分散性以及测量电路中串联电阻的精度有关。这一过程让我明白了仿真模型虽然理想,但实际电路受分布参数、接触电阻及仪表内阻的影响,往往更加复杂。

装订线

总的来说,这次实验不仅锻炼了我使用 OrCAD 进行电路预研的能力,更提升了我在示波器读数、故障排查及数据分析方面的动手能力。我认识到,优秀的模拟电路设计不仅需要严谨的计算,更需要耐心的调试和对元器件特性的充分把握。

装
订
线