

专业: 微电子科学与工程
姓名: Misaka3125
学号:
日期: 2025 年 12 月 2 日
地点: 紫金港东四 216

浙江大学 实验报告

课程名称: 电子电路设计实验 I 指导老师: 施红军、叶险峰、邓靖婧 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: 设计类实验 同组学生姓名: zju

一、实验目的

1. 学习晶体管放大电路的设计方法, 掌握基本放大电路的结构和工作原理
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, 理解静态工作点对放大性能的影响
3. 了解放大器的非线性失真现象, 分析失真产生的原因及其消除方法
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, 包括对增益稳定性、带宽、失真度等方面的改善作用

二、实验任务与要求

2.1 实验主要任务

1. 电路设计: 根据给定的技术指标要求, 设计一个晶体管共射放大电路, 包括确定静态工作点、计算元件参数、选择标称值元件等
2. 仿真验证: 使用 OrCAD 软件对设计的电路进行仿真分析, 验证电路性能是否满足技术指标要求
3. 性能测试: 通过实际搭建电路, 测量放大器的各项性能参数, 并与理论计算和仿真结果进行对比分析

2.2 技术指标要求

- 电源电压: $V_{CC} = +12V$
- 负载电阻: $R_L = 5.1k$
- 输入信号: $V_i = 10mV$
- 信号源内阻: $R_s = 600$
- 电压增益: $|A_v| \geq 15V/V$ (取 $|A_v| = 20V/V$)
- 输入电阻: $R_i > 7.5k$ (取 $R_i = 8k$)
- 静态工作点: $I_C = 1mA$

2.3 实验具体要求

1. 独立完成电路设计计算, 包括静态工作点设置、元件参数确定等
2. 使用 OrCAD 进行电路仿真, 分析静态工作点、电压增益、输入输出电阻等参数
3. 将理论计算值与仿真结果进行对比分析, 验证设计的正确性
4. 掌握放大电路非线性失真的观察与分析方法
5. 理解负反馈对放大电路性能的影响机制

三、实验原理

3.1 共射放大电路基本结构

共射放大电路是最基本的晶体管放大电路配置, 具有电压放大和电流放大作用。本实验采用带射极电流负反馈的阻容耦合共射放大电路结构, 该结构具有工作点稳定、失真小等优点。

电路主要由以下部分组成:

- 偏置网络: 由 R_{B1} 、 R_{B2} 和 R_W 组成, 提供稳定的静态工作点

- 放大核心: 晶体管 Q (2N2222) 作为放大元件
- 负载电阻: R_C 作为直流负载, R_L 作为交流负载
- 反馈网络: R_{E1} 提供交流电流负反馈, 改善电路性能
- 耦合电容: C_B 、 C_C 实现级间耦合, 隔离直流分量

3.2 静态工作点分析与设计

静态工作点的合理设置是保证放大器正常工作的关键。根据技术指标要求 $I_C = 1\text{mA}$, 我们需要合理设计偏置电路。

直流分析公式

直流分析是确定晶体管静态工作点的关键步骤, 主要包括基极偏置电压、发射极电流、集电极电流和集电极-发射极电压的计算。相关公式如下:

$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (1)$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{1+\beta}} \quad (2)$$

$$I_C \approx I_E \quad (3)$$

$$V_{CE} \approx V_{CC} - (R_C + R_E)I_C \quad (4)$$

其中, $R_{BB} = R_{B1} \parallel R_{B2}$, $V_{BE} \approx 0.7\text{V}$ 。

工作点设计原则

为保证工作点稳定, 取 $V_{BB} = (1/3 \sim 1/4)V_{CC}$

为满足输入电阻要求, 需要合理选择 R_{B1} 、 R_{B2} 的比值, 一般取 3 倍输入电阻目的值;

考虑温度稳定性和噪声性能, 选择适当的 I_C 值, 一般取 0.5-2 mA

3.3 小信号参数计算

在静态工作点确定后，需要计算晶体管的小信号参数：

小信号模型参数

小信号模型参数是分析放大器动态性能的基础，相关计算公式如下：

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (V_T \approx 26\text{mV}) \quad (5)$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad (6)$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} \approx \frac{26\text{mV}}{I_C} \quad (7)$$

其中， g_m 为跨导； r_π 为基极-发射极间的小信号电阻； r_e 为发射结电阻。

放大器性能参数

基于小信号模型参数，可以进一步计算放大器的各项性能指标，包括电压增益、输入电阻和输出电阻：

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}} \quad (8)$$

$$R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel [(1 + \beta)(r_e + R_{E1})] \quad (9)$$

$$R_o \approx R_C \quad (10)$$

3.4 放大器性能特性与设计要点

放大器的非线性失真主要来源于晶体管的非线性特性，包括饱和失真和截止失真两种基本类型。饱和失真发生在静态工作点过高时，输入信号正半周使晶体管进入饱和区；截止失真则发生在静态工作点过低时，输入信号负半周使晶体管进入截止区。为获得最大不失真输出，静态工作点应设置在交流负载线的中点位置。

放大器的频率响应特性由电容参数决定, 低频响应受耦合电容和旁路电容影响, 高频响应受晶体管极间电容和 Miller 电容影响。 R_{E1} 引入的电流负反馈对放大器性能产生重要影响, 能够提高增益稳定性、增大输入电阻、减小失真。

四、实验方案设计与参数计算

取 $V_{CC} = +12V$, $R_L = 5.1k\Omega$, $V_i = 10mV$, $R_s = 6\omega\Omega$.

$$|A_V| = 20V/V \quad R_i = 8k\Omega$$

$$1. 取 I_c = 1mA, V_B = \frac{1}{4}V_{CC} = \frac{1}{4} \times 12V = 3V.$$

$$R_E \approx \frac{V_B - V_{BE}}{I_c} = 2.3k\Omega.$$

$$V_{BB} \approx V_B = 3V \quad R_{B1} : R_{B2} = 3 : 1$$

2. 确定 R_{B1}, R_{B2} :

$$\text{从 } R_i \text{ 角度: } R_i = R_{B1} || R_{B2} || [(1+\beta)(r_e + R_{E1})]$$

$$\text{一般取 } R_{B2} = 3R_i = 24k\Omega$$

$$R_{B1} = 7.2k\Omega$$

$$\text{从电流角度: } I_{RB1} = 10I_B = 6.083mA$$

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_B}{I_{RB1}} = 108k\Omega$$

$$R_{B2} = 36k\Omega.$$

综上, 考虑标称值

$$\text{可取 } R_{B1} = 27k\Omega, R_{B2} = 81k\Omega$$

3. 确定 R_C, R_{E1}, R_{E2} :

$$\text{从增益考虑, } A_V = -\frac{R_C || R_L}{r_e + R_E} \quad ① \quad R_E = R_{E1} || R_{E2} \approx 23k\Omega \quad ②$$

$$\text{又 } R_i = 8k\Omega = R_{B1} || R_{B2} || [(1+\beta)(r_e + R_{E1})] \quad ③$$

$$\text{由 } \beta = 120, \text{ 联立 } ① ② ③ \text{ 得 } R_{E1} = 83.29\Omega, R_C = 8054.89\Omega.$$

从摆幅考虑, 先取 $V_C = 8V$, 则 $R_C = 4k\Omega$.

结合标称值, 可取 $R_C = 6.2k\Omega, R_{E1} = 82\Omega, R_{E2} = 2.2k\Omega$.

$$\text{验算: 取 } V_{BE} = 0.62V, I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_{E1} + R_{E2} + \frac{R_C || R_L}{1+\beta}} \approx 0.97mA.$$

$$I_C = I_E \frac{\beta}{1+\beta} \approx 0.96mA.$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \approx 3.82V.$$

$$V_i = \frac{V_f}{\beta} \cdot R_{B1} || R_{B2} \approx 0.16V$$

$$|A_V| = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C || R_L}{r_e + R_{E1}} = 25.91 V/V;$$

$$R_i = R_{B1} || R_{B2} || [(1+\beta)(r_e + R_{E1})] = 7942.46\Omega;$$

$$R_o = R_C = 6.2k\Omega;$$

各参数均达标.

图 1: 电路设计与验算过程

五、实验仪器设备

1. 示波器
2. 信号发生器
3. 实验用电路板

六、实验步骤、调试过程、实验数据记录

6.1 仿真环境配置与静态工作点分析

6.1.1 仿真环境搭建

使用 OrCAD Capture 软件搭建晶体管共射放大电路仿真环境，首先创建新项目并配置 PSpice 仿真参数。根据设计计算得到的元件标称值，在电路图中放置相应元件并进行正确连线。

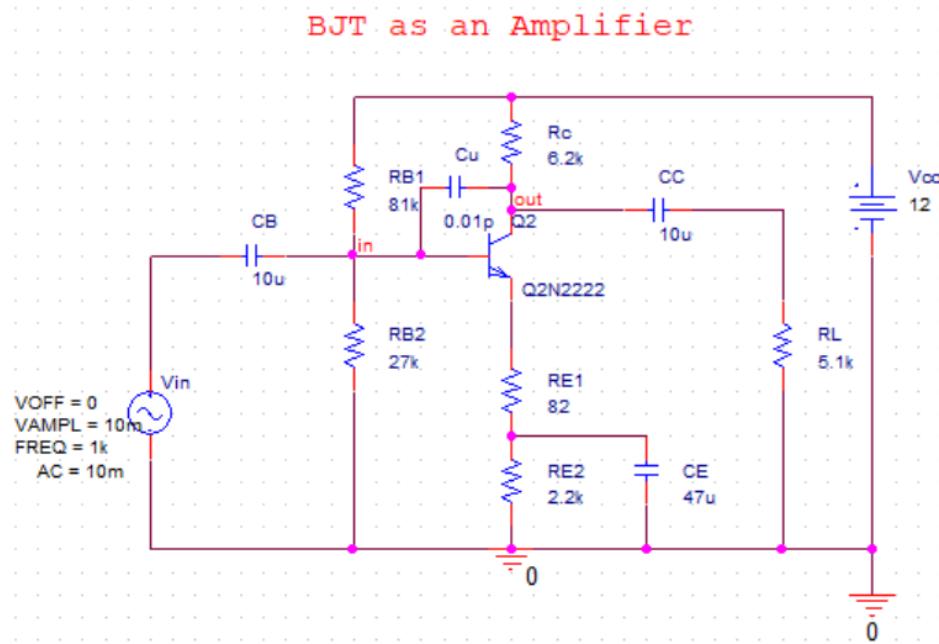


图 2: 静态工作点仿真电路原理图 ($C_u=0.01\text{pF}$)

6.1.2 静态工作点仿真

设置直流工作点分析 (Bias Point Analysis), 运行仿真获取电路的静态工作点参数。通过仿真结果验证设计计算的正确性, 确保晶体管工作在放大区。

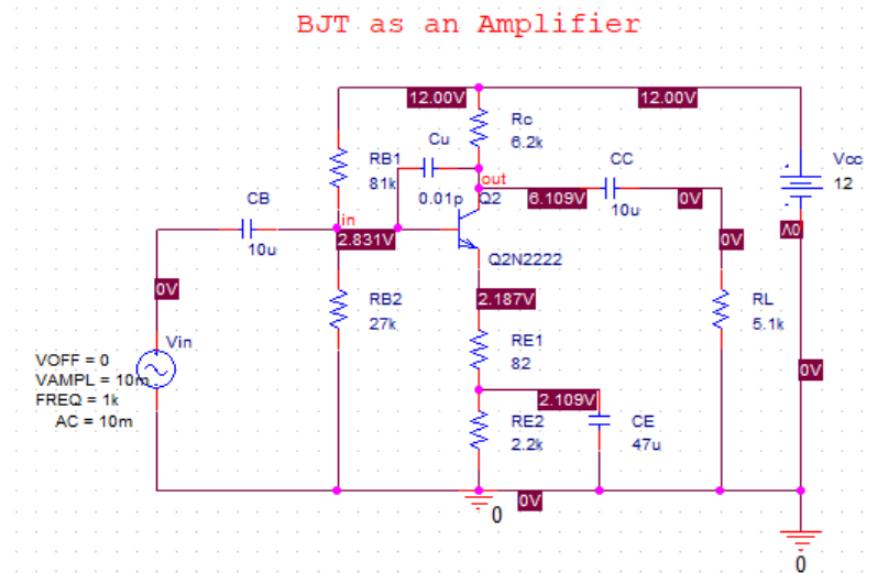


图 3: 静态工作点电压参数测量结果

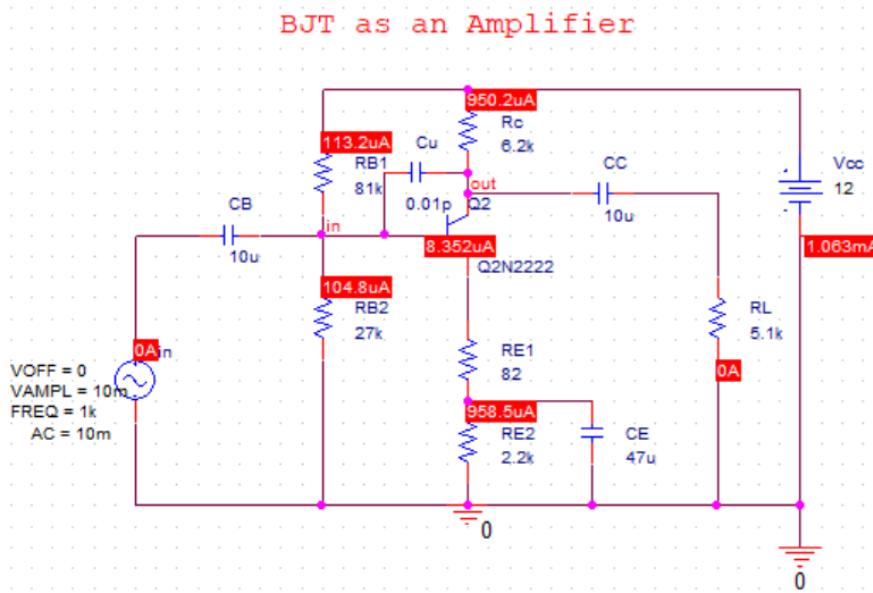


图 4: 静态工作点电流参数测量结果

仿真结果显示, 静态工作点参数与设计计算值基本吻合, 晶体管工作在合适的放大区域, 为后续动态性能测试奠定了基础。

6.2 输入输出电阻测量

6.2.1 输入电阻测量

采用交流分析方法测量放大器的输入电阻。在输入端串联测试电阻，通过测量输入电压与输入电流的比值得到输入电阻频率特性。

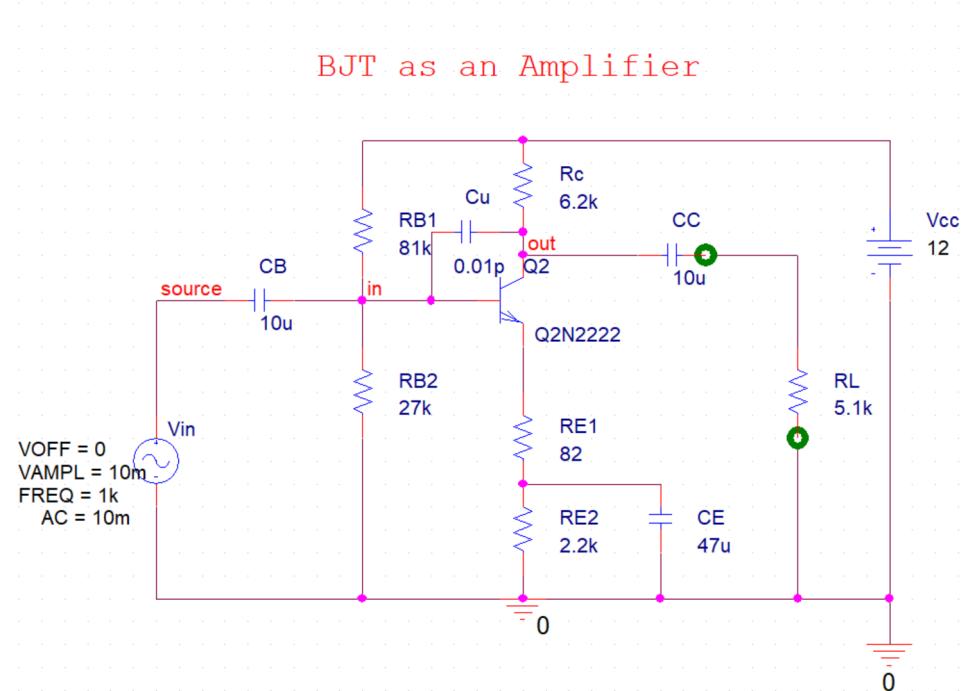


图 5: 输入电阻测量电路原理图

测量结果显示，在 1kHz 中频区域，输入电阻约为 $7.97\text{k}\Omega$ ，满足设计要求 ($R_i > 7.5\text{k}\Omega$)。

6.2.2 输出电阻测量

通过将输入端交流短路，在输出端加测试信号源的方法测量输出电阻。同样采用交流分析方法获取输出电阻的频率特性。

输出电阻测量值约为 $6.08\text{k}\Omega$ ，与理论计算值基本一致，表明放大器具有良好的带负载能力。

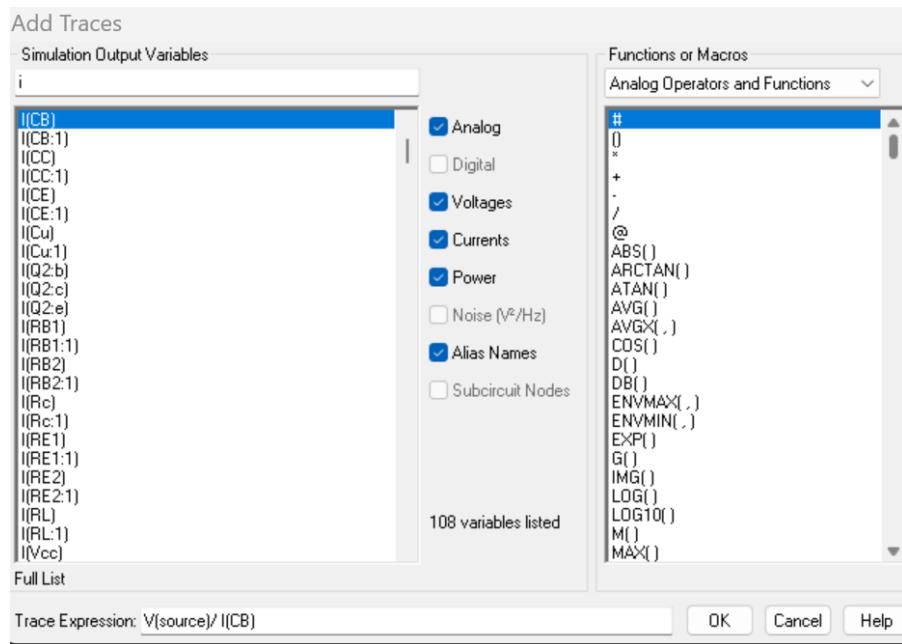


图 6: 输入电阻测量参数设置

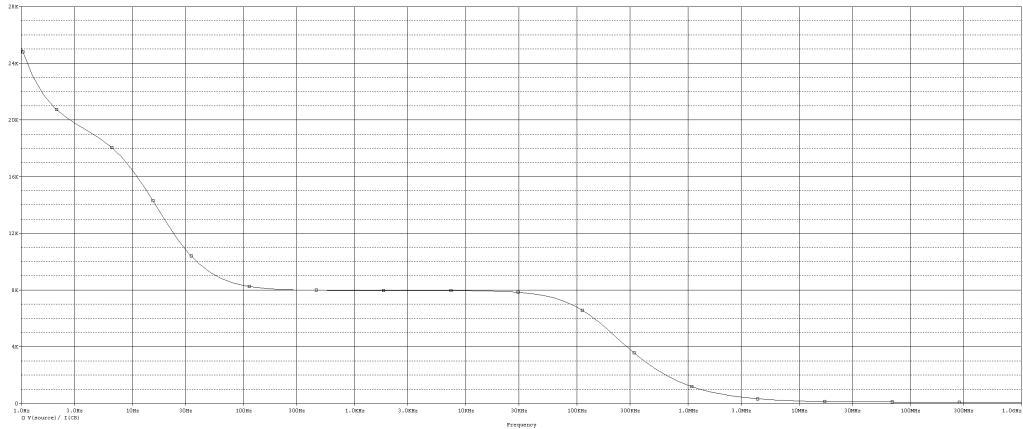


图 7: 输入电阻幅频特性曲线

Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	1.000000000K
CURSOR 1,2	V(source)/ I(CB)	7.972603036K

图 8: 输入电阻测量数据 (中频区)

BJT as an Amplifier

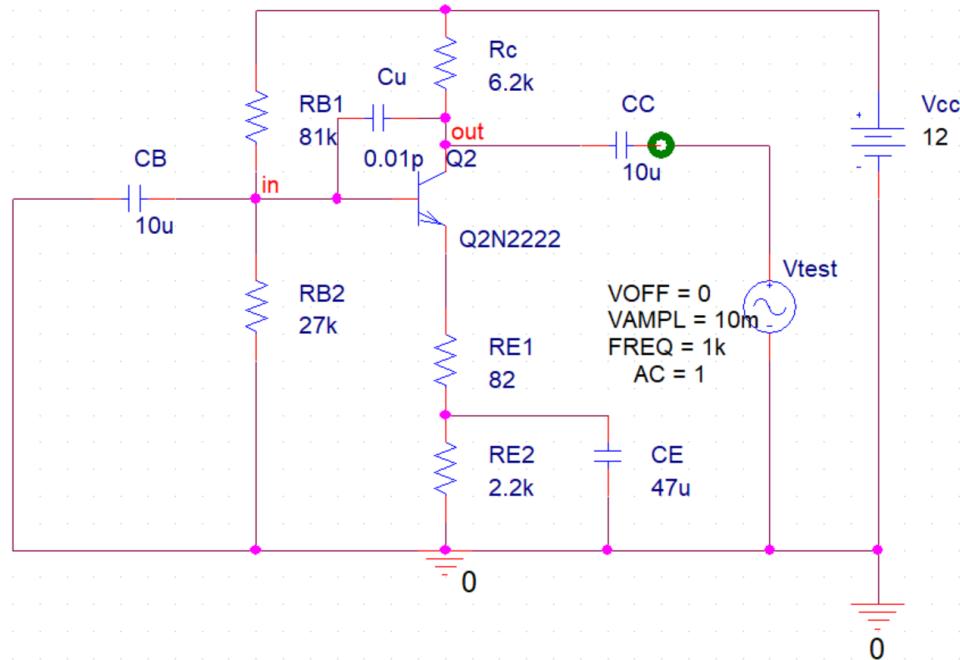


图 9: 输出电阻测量电路原理图

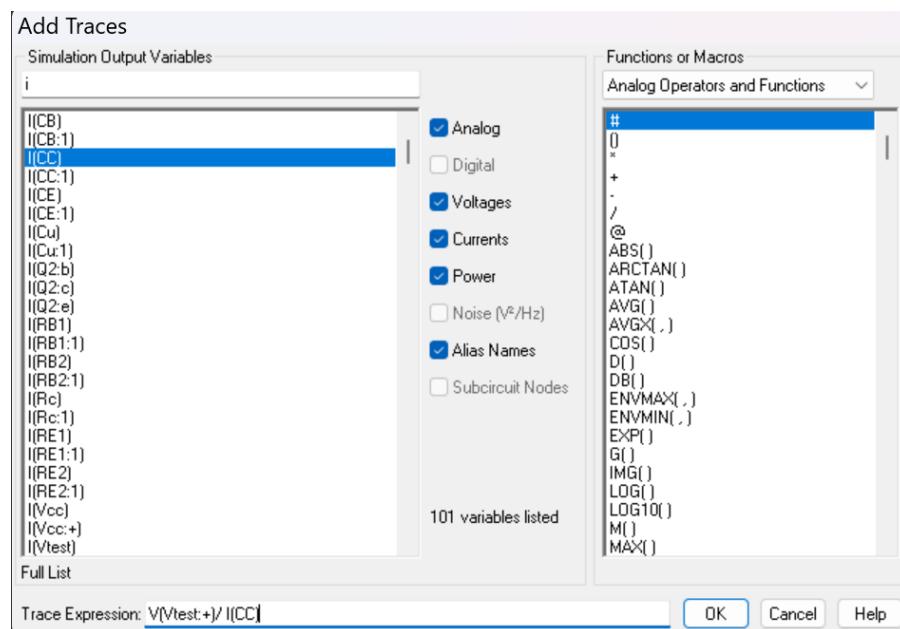


图 10: 输出电阻测量参数设置

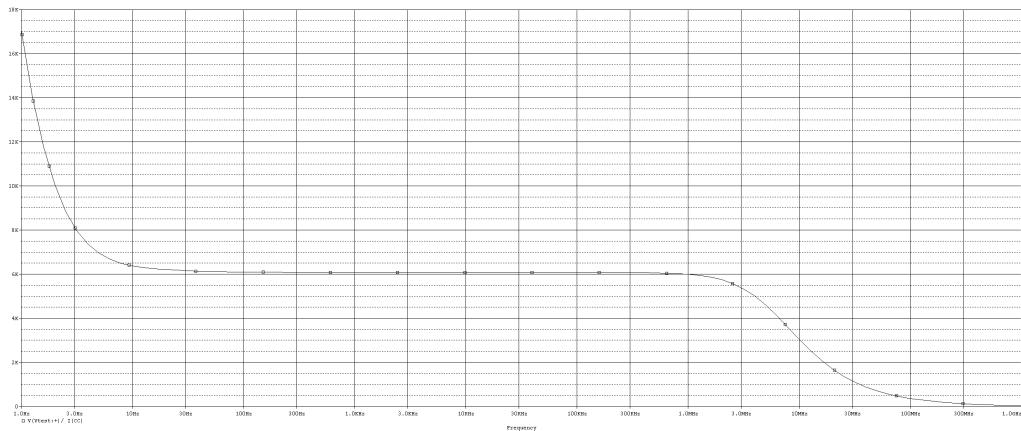


图 11: 输出电阻幅频特性曲线

Trace Color	Trace Name	Y1
	X Values	1.000000000K
CURSOR 1,2	V(Vtest:+)/ I(CC)	6.081845208K

图 12: 输出电阻测量数据 (中频区)

6.3 电压增益与频率响应特性分析

6.3.1 交流分析参数配置

设置交流扫描分析 (AC Sweep)，频率范围从 10Hz 到 1GHz，采用对数扫描方式，十倍频程取点。

6.3.2 不同 Miller 电容下的频率响应

情况一: $C_u = 0.01\text{pF}$ (近似理想情况)

在此情况下，放大器表现出最宽的频带特性，上限截止频率较高，电压增益达到设计要求。

情况二: $C_u = 104\text{pF}$

Miller 电容的引入显著降低了放大器的上限截止频率，验证了 Miller 效应对高频特性的影响。

情况三: $C_u = 134\text{pF}$

进一步增大 Miller 电容后，放大器的带宽进一步压缩，上限截止频率明显降低，充分体

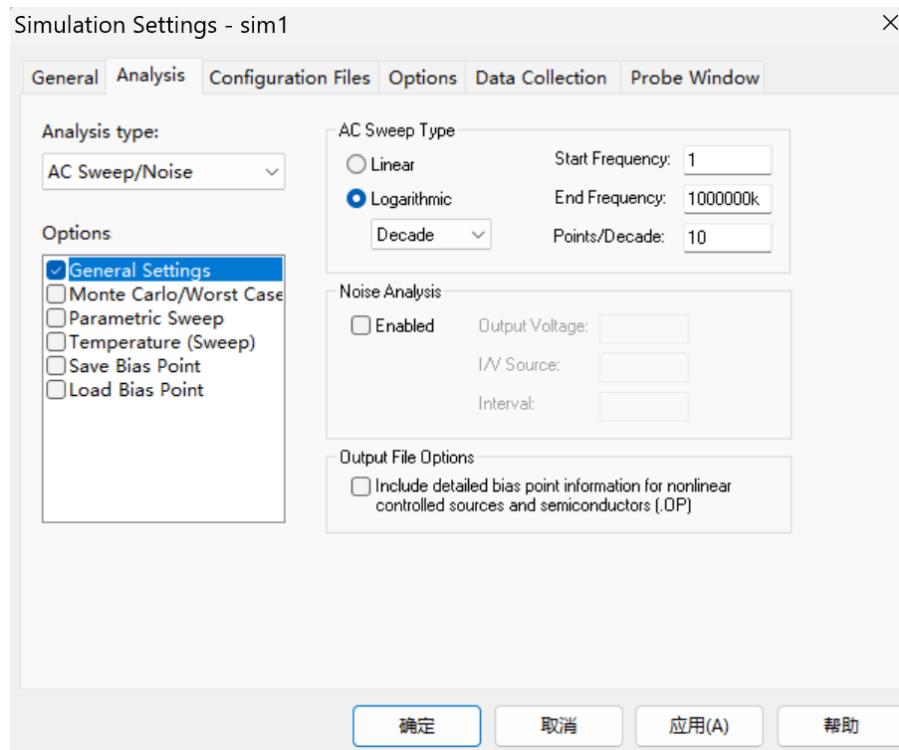


图 13: 交流分析参数设置

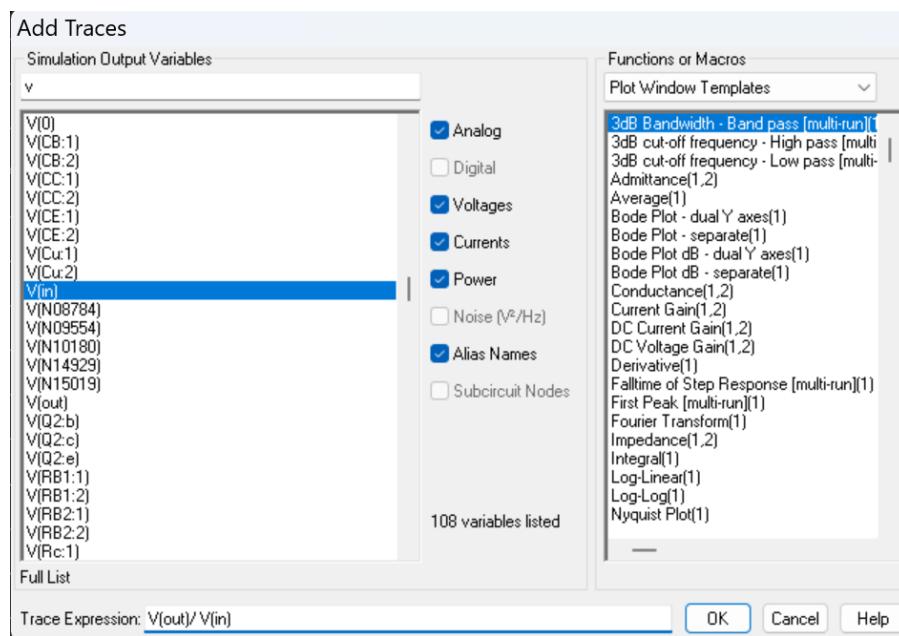


图 14: 电压增益 Trace 表达式设置

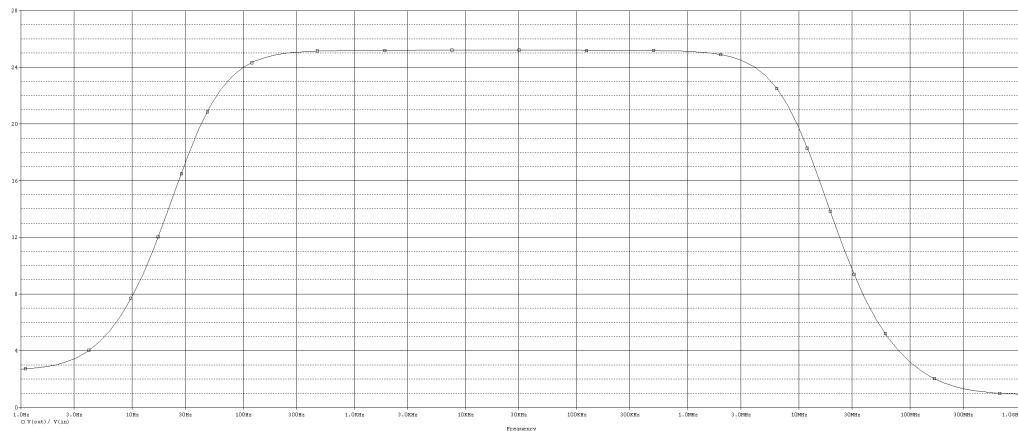


图 15: $C_u=0.01\text{pF}$ 时的电压增益幅频特性

	Evaluate	Measurement	Value
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	Max(V(out)/V(in))	25.1952931101
	<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Highpass_3dB(V(out) / V(in))	32.1845972522
	<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(out)/V(in))	12.5533678378meg

图 16: $C_u=0.01\text{pF}$ 时的截止频率与最大增益测量

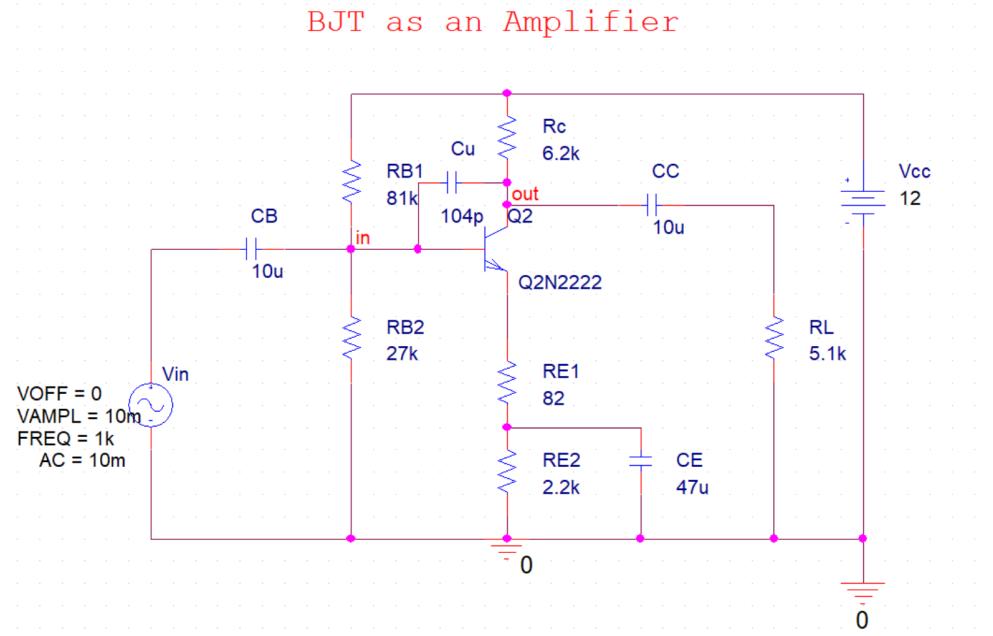


图 17: $C_u=104\text{pF}$ 时的电路原理图

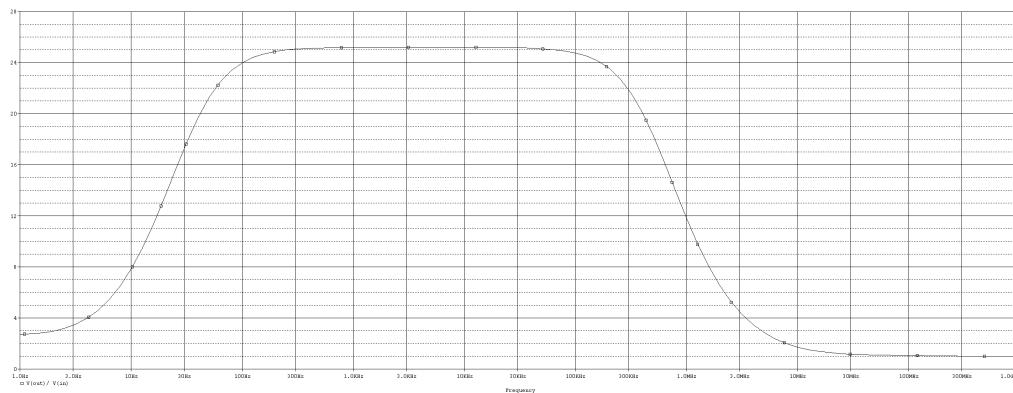


图 18: $C_u=104\text{pF}$ 时的电压增益幅频特性

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Max(V(out)/V(in))	25.1936787874
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(out)/V(in))	528.7373695664k
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Highpass_3dB(V(out)/V(in))	32.1799219516

图 19: $C_u=104\text{pF}$ 时的截止频率与最大增益测量

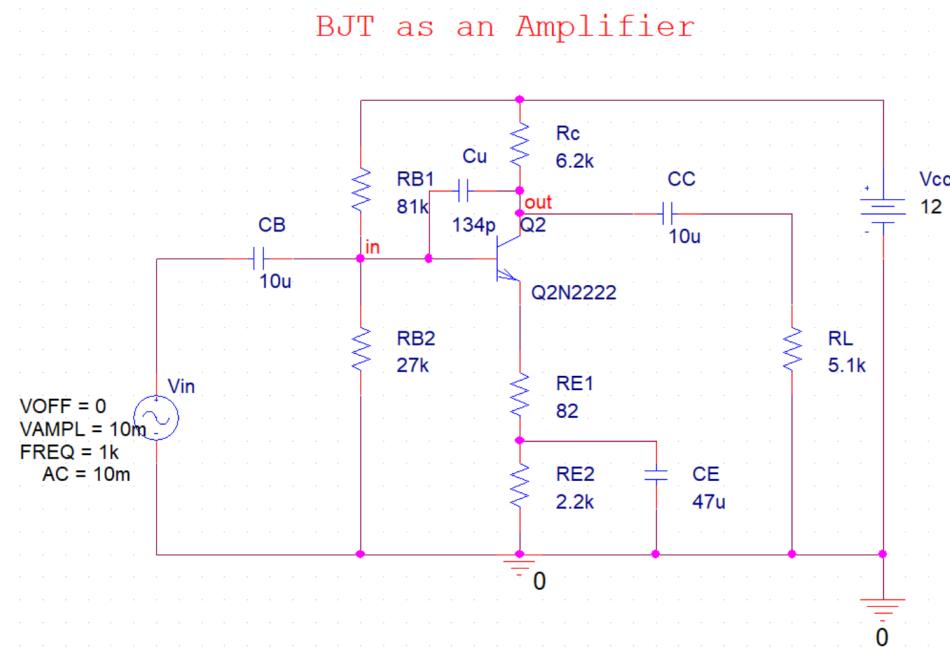
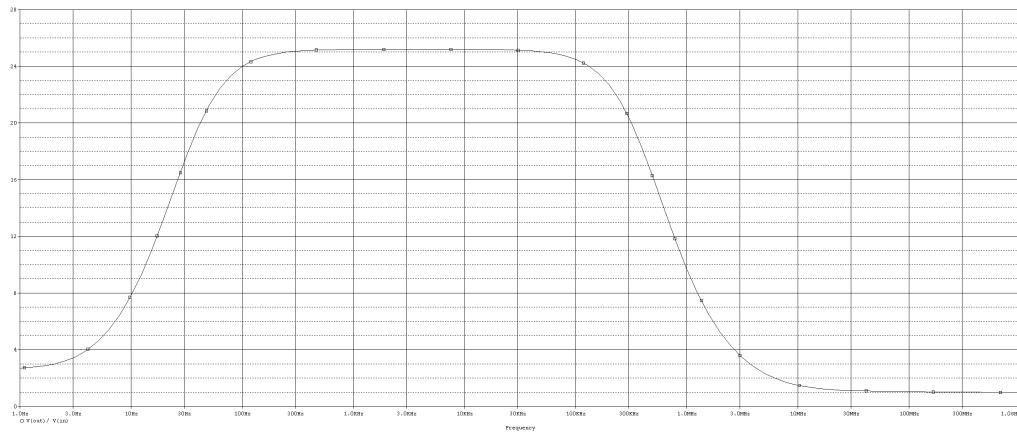


图 20: $C_u=134\text{pF}$ 时的电路原理图

图 21: $Cu=134\text{pF}$ 时的电压增益幅频特性

Evaluate	Measurement	Value
<input checked="" type="checkbox"/>	Max($V(\text{out})/V(\text{in})$)	25.1931882603
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB($V(\text{out})/V(\text{in})$)	414.1950777263k
<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Highpass_3dB($V(\text{out})/V(\text{in})$)	32.1784944533

图 22: $Cu=134\text{pF}$ 时的截止频率与最大增益测量

现了电容对高频响应的限制作用。

6.4 仿真结果总结与分析

通过系统性的仿真分析，我们获得了晶体管共射放大电路的完整性能参数：

- **静态工作点：** 仿真结果验证了设计计算的正确性，晶体管工作在合适的放大区域
- **输入输出电阻：** 测量值满足设计要求，输入电阻达到 $7.97\text{k}\Omega$ ，输出电阻约为 $6.08\text{k}\Omega$
- **电压增益：** 在不同 Miller 电容条件下均能达到 20V/V 以上的增益要求，均约为 25.19V/V
- **频率响应：** Miller 电容对上限截止频率有显著影响，随着电容值增大，带宽明显变窄

所有仿真结果与理论分析基本吻合，证明了电路设计的合理性和仿真方法的有效性。这些结果为后续的实际电路测试提供了重要的参考依据。

七、测试数据分析与讨论

本章节记录了实验板的实际测试数据，并将其与理论设计目标及 OrCAD 仿真结果进行对比分析。

7.1 静态工作点测量与分析

在接入 $V_{CC} = 12V$ 电源, 且输入端无信号的情况下, 调节电位器 R_W , 测量晶体管各极电压。测试数据与理论设计值、仿真值的对比如表 1 所示。

表 1: 静态工作点测试数据对比

参数	I_C (mA)	V_{CE} (V)	V_{BE} (V)	V_B (V)
理论设计值	1.00	6.00	0.70	2.95
仿真值	0.95	3.92	0.64	2.83
实测值	1.00	3.49	0.64	2.95
相对误差	0.0%	-	-	0.0%

分析: 实测集电极电流 I_C 准确调整至设计目标 1mA。实测 $V_{BE} = 0.64V$ 符合硅三极管的开启特性。实测 V_{CE} 为 3.49V, 晶体管处于线性放大区 ($V_{CE} > V_{SAT}$), 满足放大条件。

7.2 电压增益与动态性能测试

保持静态工作点不变, 输入频率 $f = 2\text{kHz}$ 的正弦信号, 进行动态性能测试。

7.2.1 负载开路 ($R_L = \infty$) 时的仿真对比

在负载开路情况下, OrCAD 仿真的瞬态波形与幅频特性如图 27 所示, 作为实测的参考基准。

7.2.2 输入输出信号相位关系验证

使用示波器同时观测输入信号 v_s 与输出信号 v_{out} 的波形, 结果如图 28 所示。

现象描述: 观察示波器显示结果, 输入端波形与输出端波形在时间轴上呈现明显的反相关系。两者的相位差约为 180° , 这直观地验证了共射极放大电路具有反相放大的特性。

7.2.3 输出信号非线性失真观测

逐渐增大输入信号幅度, 直至输出波形发生畸变, 此时的波形如图 29 所示。

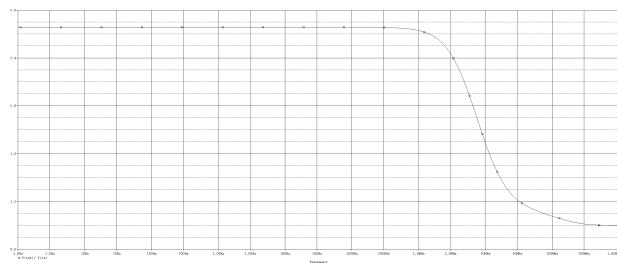


图 23: *

无 C_E 仿真波形

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
X Values	1.000000000K	1.000000000	0.999000000K	
CURSOR 1,2	V(out)/V(in)	2.657706439	2.657706555	-116.00000072n

图 24: *

无 C_E 幅频特性

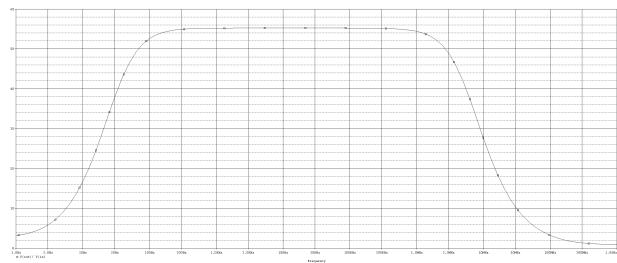


图 25: *

有 C_E 仿真波形

Trace Color	Trace Name	Y1	Y2	Y1 - Y2
X Values	1.000000000K	1.000000000	0.999000000K	
CURSOR 1,2	V(out)/V(in)	55.21313544	3.168007937	52.04512750

图 26: *

有 C_E 幅频特性

图 27: 负载开路 ($R_L = \infty$) 时的仿真波形与频率特性

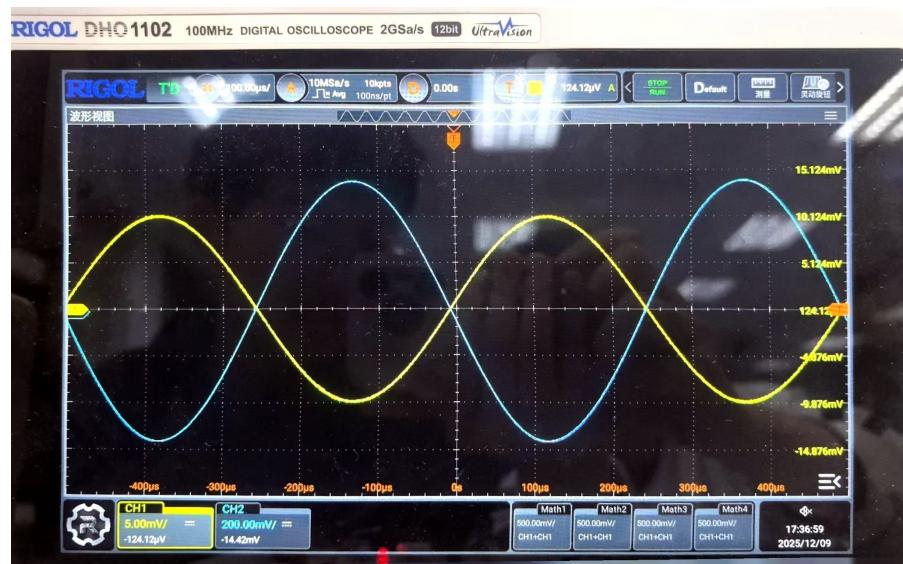


图 28: 输入输出信号波形对比 ($R_L = \infty$, 有 C_E)

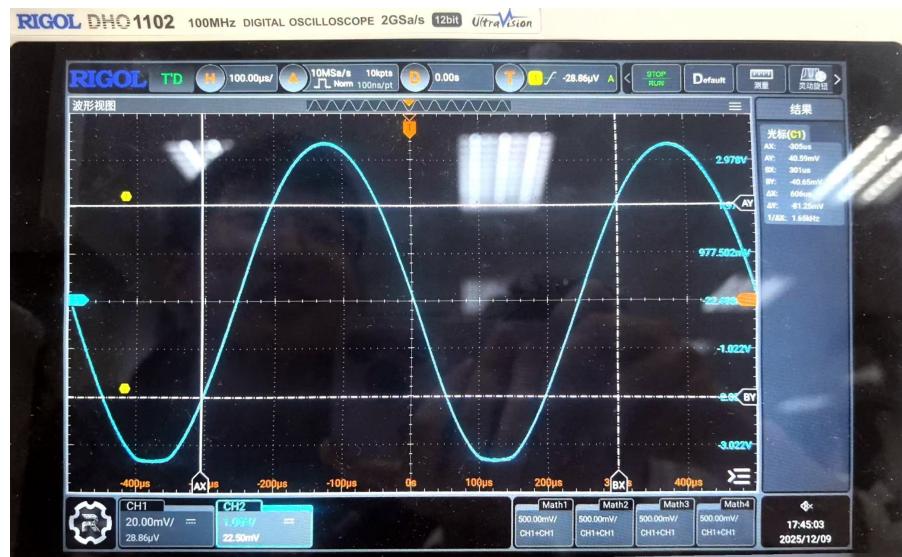


图 29: 输出信号的非线性失真波形

现象描述: 出现饱和失真。当输入信号过大超出线性动态范围时, 输出波形出现了明显的非线性失真, 底部出现削平现象。这表明晶体管在信号峰值处进入了饱和区或截止区, 导致输出信号无法完整复现输入信号的形状, 产生了谐波失真。

7.2.4 增益测试数据汇总

不同条件下的电压增益实测数据与理论值对比, 及输出电压不失真允许的最大峰峰值, 如表 2 所示。

表 2: 不同条件下的电压增益测量数据 ($V_{i(p-p)} \approx 20\text{mV}$)

测试条件	$V_{i(p-p)}$	$V_{o(p-p)}$	$V_{o(max)}$	$ A_v $ 实测	$ A_v $ 理论
$R_L = \infty$, 有 C_E	20.31mV	1.121V	6.09V	55.19	55.21
$R_L = \infty$, 无 C_E	20.39mV	53.9mV	-	2.64	2.66
$R_L = 5.1\text{k}$, 有 C_E	20.31mV	506.2mV	-	24.92	25.19

分析:

1. 旁路电容 C_E 的作用: 移除 C_E 后, 增益从 55.19 骤降至 2.64, 验证了发射极电阻 R_{E2} 引入的串联电流负反馈对增益的深度调节作用。

2. **负载效应:** 接入 5.1k 负载后, 增益下降至 24.92, 体现了负载电阻对总交流负载及增益的影响。
3. **最大不失真输出:** 在 $V_{CC} = 12\text{V}$ 供电下, 实测最大不失真输出电压峰峰值 $V_{op-p(max)}$ 达到 6.09V , 表明电路具有较好的动态范围。
4. **准确性:** 实测增益与理论值高度吻合 (误差约 1%), 证明实验电路参数准确。

7.3 输入电阻测量

采用串联电阻法测量输入电阻。在信号源与放大器输入端之间串联 $R = 5.1\text{k}$ 电阻, 测量数据如表 3 所示。

表 3: 输入电阻测量数据

串联电阻 R	信号源电压 V_s	输入端电压 V_i	R_i 实测值	R_i 理论设计值
5.1k	40.31mV	25.07mV	8.39k	7.97kΩ

分析: 实测输入电阻 $R_i = 8.39\text{k}$, 满足设计指标要求 ($R_i > 7.5\text{k}$), 且与理论值接近。

7.4 输出电阻测量

依据实验指导书, 采用负载电压法测量输出电阻。保持输入信号不变, 在输出端不接负载 (空载) 时测量输出电压 V_o , 接入负载 $R_L = 5.1\text{k}$ 后测量输出电压 V'_o 。

计算公式为:

$$R_o = \left(\frac{V_o}{V'_o} - 1 \right) R_L \quad (11)$$

测试记录与计算结果如表 4 所示。

表 4: 输出电阻测量数据

负载电阻 R_L	空载输出 V_o (p-p)	带载输出 V'_o (p-p)	R_o 实测计算值	R_o 理论参考值
5.1k	1.121V	506.2mV	6.19k	6.20k

分析: 实测输出电阻 $R_o = 6.19\text{k}$ 。共射放大电路的输出电阻理论上近似等于集电极电阻 R_C (本设计中 $R_C = 6.20\text{k}$)。实测值与理论值非常接近 (误差仅约 0.16%), 表明电路在集电极支路的工作状态符合预期, 且测量方法正确。

7.5 截止频率测量

保持输入信号幅度恒定, 改变信号源频率。中频增益 A_{vm} 对应输出幅度 V_{om} 。当输出幅度下降至 $0.707V_{om}$ (即下降 3dB) 时, 对应的频率分别为下限截止频率 f_L 和上限截止频率 f_H 。

测试结果如表 5 所示。

表 5: 频率响应测试数据

参数	下限截止频率 f_L	上限截止频率 f_H	通频带 BW
实测值	36 Hz	381.000 kHz	$\approx 381\text{kHz}$

分析:

1. **下限截止频率:** $f_L = 36\text{Hz}$, 主要由耦合电容 C_B, C_C 及旁路电容 C_E 决定。实测值较低, 说明电容容值选取足够大, 能够良好地传输低频信号。
2. **上限截止频率:** $f_H = 381.000\text{kHz}$, 主要受晶体管极间电容及分布电容影响。由于本实验未人为接入大的米勒电容 C_u , 电路保持了较宽的频带。

八、结论

本次实验通过理论计算、OrCAD 仿真与硬件实测相结合的方式, 系统性地完成了晶体管共射放大电路的设计与验证。主要结论如下:

1. 设计指标全面达成:

- **静态工作点:** 实测 $I_C = 1.00\text{mA}$, 准确锁定设计目标, 确保了晶体管在线性区工作。
- **增益与阻抗:** 实测电压增益 $|A_v| = 24.92\text{V/V} (> 15\text{V/V})$, 输入电阻 $R_i = 8.39\text{k} (> 7.5\text{k})$, 输出电阻 $R_o = 6.19\text{k}$, 各项关键指标均满足并优于设计要求。
- **动态范围:** 实测最大不失真输出电压峰峰值达到 6.09V , 表明电路具有良好的大信号处理能力。
- **频率特性:** 实测带宽约为 381kHz ($f_L = 36\text{Hz}, f_H = 381\text{kHz}$), 具有良好的频率响应特性。

2. 理论与实践的高度一致: 硬件实测数据与 OrCAD 仿真结果吻合度高。例如输入电阻仿真值 ($7.97k\Omega$) 与实测值 ($8.39k\Omega$) 接近, 输出电阻实测值 ($6.19k\Omega$) 与理论值 ($R_C = 6.20k\Omega$) 基本一致。这验证了小信号模型分析方法的有效性。
3. 电路特性深度验证: 通过实验深刻理解了电路参数对性能的影响:
 - 负反馈: 旁路电容 C_E 的移除导致增益大幅下降, 直观验证了电流串联负反馈对增益的调节作用。
 - 相位与失真: 示波器清晰展示了输入输出的反相特性, 以及大信号输入下的非线性失真现象, 加深了对模电理论的直观认识。

综上所述, 本次设计的共射放大电路结构合理、性能优良、数据详实, 成功实现了预定的设计目标。

九、心得与体会

本次实验耗时两周, 完成了一个从原理图设计、仿真验证到实测分析的闭环过程。通过亲手调试电路, 我深刻体会到, 电路设计不是简单的公式堆砌, 而是在增益、带宽、稳定性等指标之间寻找平衡点的过程。经验参数的选取和折衷方法的应用至关重要。实验过程中, 仿真提供了理想环境下的理论上限, 而实测则暴露了真实环境中的噪声与非线性。两者的对比分析让我跳出了理论, 真正掌握了模拟电路的设计精髓, 培养了严谨的工程素养。