

浙江大学实验报告

专业：信息工程
姓名：胡东东
学号：3240102873
日期：2025 年 12 月 01 日
地点：东 4-216

课程名称：电子电路设计实验 I 指导老师：施红军/叶险峰/邓靖靖 成绩：

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 实验类型：设计性实验 同组学生姓名：赵皓翌

晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

一、实验目的

学习晶体管放大电路的设计方法，掌握晶体管放大电路静态工作点的设置、测量与调整方法，了解放大器的非线性失真，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，理解负反馈对放大电路性能的影响。

二、实验方案设计

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。

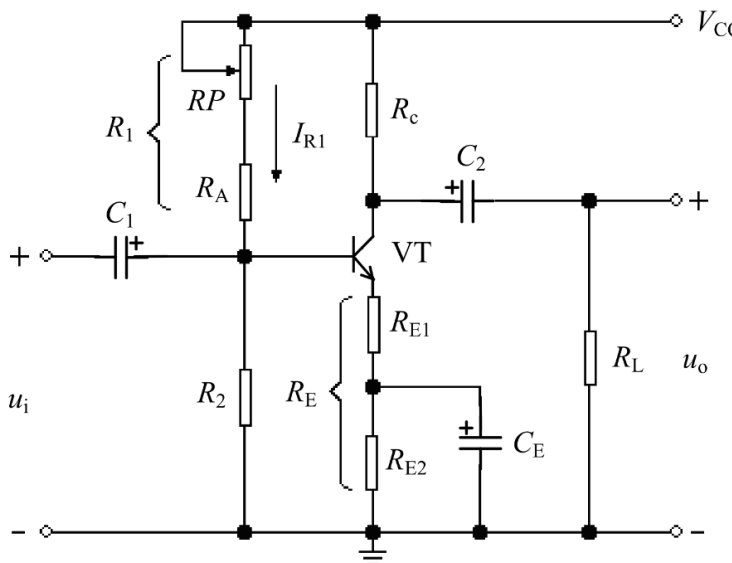


图 1 带射极负反馈的共射放大电路

三、实验原理

(1) 静态工作点计算

静态工作点计算主要是确定晶体管的静态电流 I_C 和集射静态压降 V_{CE} 。 I_C 值用来计算小信号模型参数，进而计算放大电路的电压增益、输入电阻、输出电阻等主要性能指标， V_{CE} 值用来判断晶体管是否处于放大状态。

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就可计算出准确得多的直流结果。

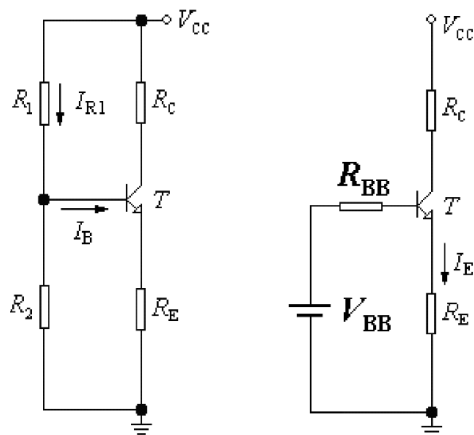


图 2 直流通路及其戴维宁等效电路

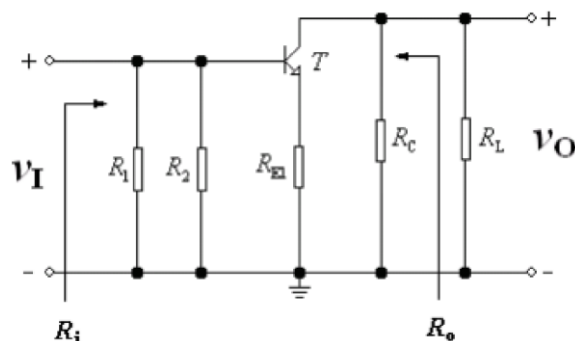


图 3 交流通路

(2) 交流性能指标计算

图 1 所示电路的交流通路如图 3 所示。性能指标计算前，先算出需要用到的晶体管小信号模型参数：

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad r_e = \frac{\alpha}{g_m}$$

①电压增益 A_v :

共射放大电路从基极到集电极的电压增益：值为集电极总电阻与发射极总电阻之比，相位为反相关系。

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

②输入电阻 R_i :

放大器的输入电阻是指从信号源位置向放大电路输入端视入的交流电阻。它反映了放大器将从信号源开路电压中获取多少比例的分压。其理论值按图 3 的交流通路计算为：

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

③输出电阻 R_o :

放大器的输出电阻是指从负载位置向放大电路输出端视入的交流电阻。它反映了负载将从放大器输出的开路电压中获取多少比例的分压。其理论值为： $R_o \approx R_C$

(3) 静态工作点失真

静态工作点过高或过低都容易产生非线性失真。若 Q 点过高，如图 4 所示的 Q_1 ，稍大的输入信号正半周将使晶体管进入饱和区， β 值明显减小，因而 i_c 波形将出现顶部压缩、输出电压 u_{ce} 波形将在底部压缩，这称为饱和失真；若 Q 点太低，如图 4 所示的 Q_2 ，稍大的输入信号负半周将使晶体管进入截止区，因而 i_c 波形将出现底部压缩、输出电压 u_{ce} 波形将在顶部压缩，这称为截止失真。

大信号工作时，为了得到最大不失真输出电压幅度，其静态工作点应设在交流负载线的中间位置，如图 5 所示。但当输出信号幅度不是太大时， Q 点不一定要选在交流负载线 midpoint，而是可根据其他要求来选择。例如，希望放大器耗电少、噪声低或输入阻抗高， Q 点可选得低一些；而当希望放大器增益高时，就要求 Q 点适当高一些。

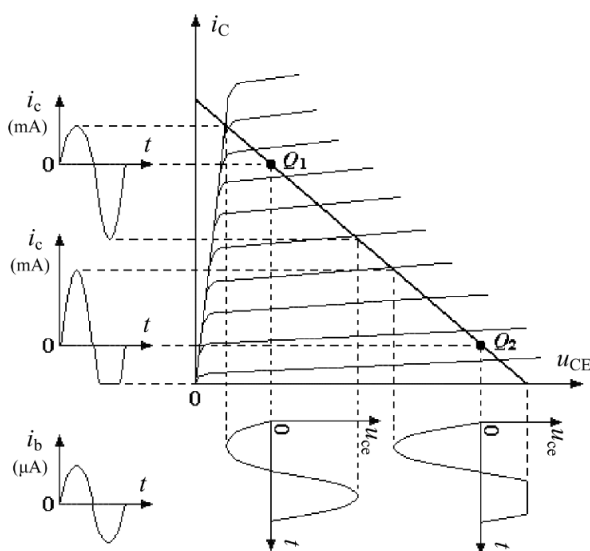


图 4 静态工作点选取不当产生的非线性失真

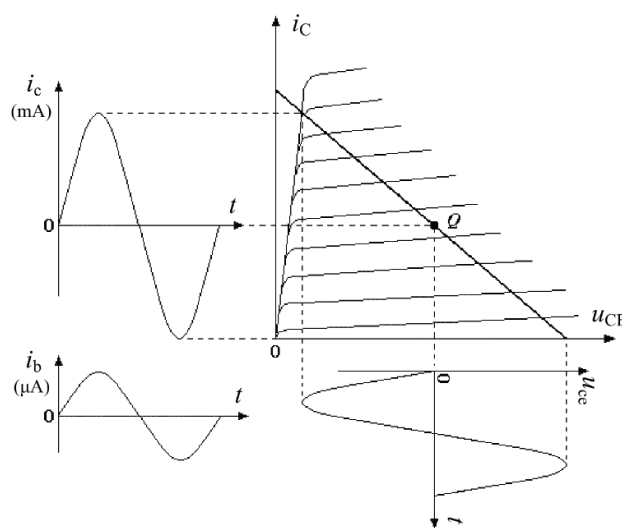


图 5 为获得最大不失真输出电压的静态工作点选取

四、实验任务要求

- ①自己提出合理的性能指标要求，设计阻容耦合单级放大电路；
- ②设计要求：写出详细设计过程并进行验算，用软件进行仿真；
- ③电路安装、调整与测量：自己编写调试步骤，自己设计数据记录表格；
- ④探索研究内容：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；

五、实验步骤与实验数据记录

(1) 设计阻容耦合单级放大电路并验算:

设计部分的计算:

已知条件 $V_{CC}=12V$, $R_L=5.1k\Omega$, $V_i=10mV$, $R_S=600\Omega$, $\beta=120$

性能指标要求: $|A_v| > 18V/V$, $R_i > 7.5k\Omega$, $f_L < 50Hz$.

取晶体管静态电流 $I_C=1mA$.

取 $V_B = \frac{1}{3} V_{CC} = 4V$ 则 $R_E = \frac{V_B - V_{BE}}{I_C} = 3.3k\Omega$, 取标称值 $3.3k\Omega$

当 $I_{R1} \gg I_B$ 时, $V_{BB} \approx V_B = 4V$. 由 V_{BB} 式可得 $12 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4V$. 因此 $R_1:R_2 = 2:1$

① 从输入电阻计算式看, 取 R_2 为 R_i 下限值的 3 倍即可. 取 $R_2=22k\Omega$, 则 $R_1=44k\Omega$.

② 按 $I_{R1} \gg I_B$. 取 $I_{R1} = 12I_B = 12 \cdot \frac{I_C}{\beta} = 0.1mA$. 则 $R_1 = \frac{V_{CC} - V_B}{I_{R1}} = 80k\Omega$, $R_2 = 40k\Omega$

综上所述: R_2 可取标称值 $30k\Omega$, R_1 可取值为 $60k\Omega$.

为使静态工作点容易调整, R_1 可由 $36k\Omega$ 固定电阻和 $100k\Omega$ 电位器串联构成.

由 $I_C=1mA$ 得 $r_e = \frac{\alpha}{g_m} = \frac{\beta V_T}{(\beta+1)I_C} = 26\Omega$. 取 $|A_v|=20V/V$. 则 $|A_v| = \frac{R_C \parallel 5100}{26 + R_{E1}} = 20$

① 从输入电阻 R_i 入手. 取 $R_i=8k\Omega$. 则有 $R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel (1+\beta)(r_e + R_{E1})$

得 $R_{E1} = 84\Omega$ $R_{E2} = 3.2k\Omega$ $R_C = 3.87k\Omega$

② 从输出信号摆幅考虑. 取 $V_C = \frac{2}{3} V_{CC} = 8V$. 则 $R_C = \frac{V_{CC} - V_C}{I_C} = 4k\Omega$. $R_{E1} = 86\Omega$ $R_{E2} = 3.2k\Omega$

综上所述, R_C 取标称值 $3.9k\Omega$. R_{E1} 取 82Ω . R_{E2} 取 $3.3k\Omega$

电容不进行计算. 取 $C_1=C_2=10\mu F$. $C_E=47\mu F$.

总结设计值: $R_1=60k\Omega$ $R_2=30k\Omega$ $R_C=3.9k\Omega$ $R_{E1}=82\Omega$ $R_{E2}=3.3k\Omega$

$C_1=10\mu F$ $C_2=10\mu F$ $C_E=47\mu F$

验算部分的计算:

验算: $V_{BB} = V_{CC} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4V$ $R_E = R_{E1} + R_{E2} = 3382\Omega$ $R_{BB} = R_1 \parallel R_2 = 20k\Omega$

则 $I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{1+\beta}} = \frac{0.953}{0.945} mA$ $I_C = \frac{\beta}{1+\beta} I_E = 0.945 mA$

$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 8.31V$ $V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C = 5.12V$

$r_e = \frac{\alpha}{g_m} = 27.94\Omega$ $\therefore |A_v| = \frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}} = 20.10V/V$

$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel (1+\beta)(r_e + R_{E1}) = 7989\Omega$ $R_o = R_C = 3.9k\Omega$

总结验算值: $I_C = 0.945mA$ $V_{CE} = 5.12V$

$|A_v| = 20.10V/V$ $R_i = 7.989k\Omega$ $R_o = 3.9k\Omega$

(2) 对设计的阻容耦合单级放大电路进行 OrCAD 仿真分析:

①利用 OrCAD 套件中的 Capture 软件输入并编辑如图 1 所示的阻容耦合单级放大电路，并对其进行仿真分析，显示该电路的偏置电压与偏置电流如图 6、图 7 所示：

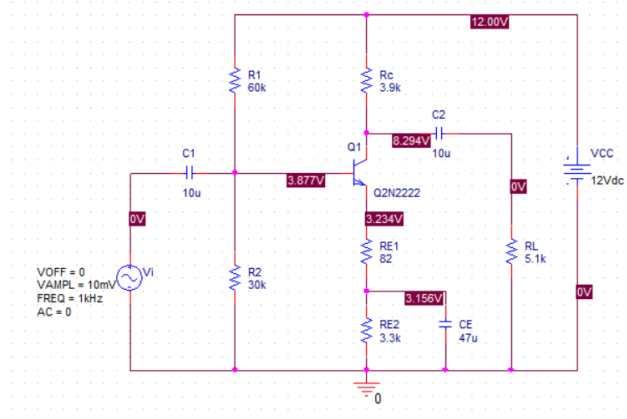


图 6 偏置电压

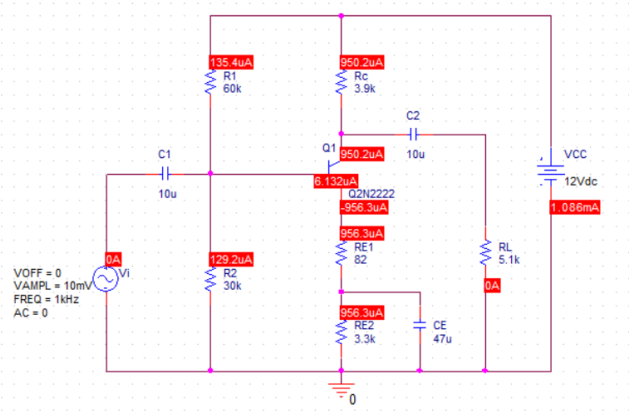


图 7 偏置电流

②对电路进行交流分析，运行后在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择 V(Vout)/V(Vin)作输出量，显示出幅频特性如图 8 所示。启动标尺测出在频率为 1kHz 处的电压增益为 19.967。

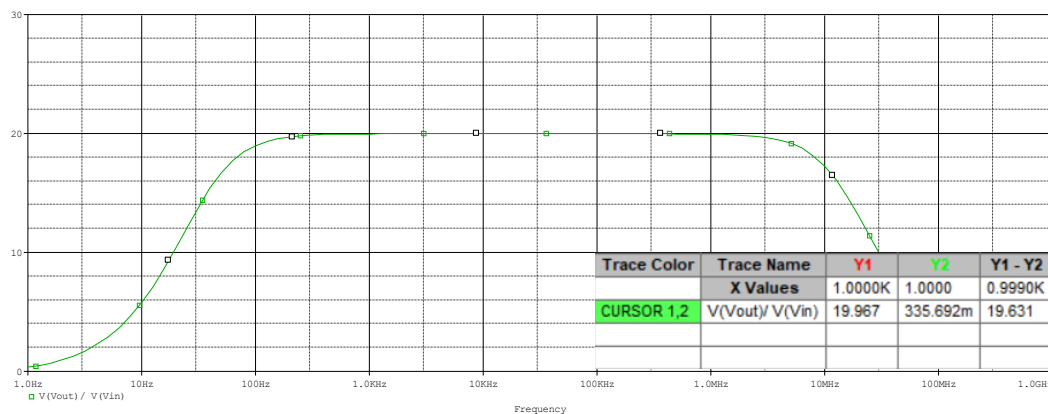


图 8 V(Out)/V(Vin)幅频特性与游标示数

③进行交流分析后，在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择 V(Vin)/I(C1)作输出量，显示出输入电阻的频率特性如图 9 所示。启动标尺测出在 $f=1\text{kHz}$ 处的输入电阻为 $9.607k\Omega$

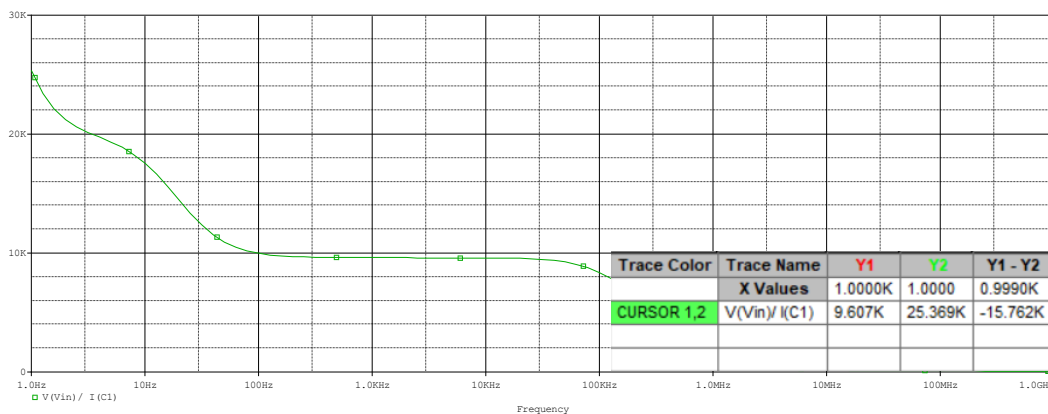


图 9 输入电阻的频率特性与游标示数

④将电路的输入端短路，负载开路，在输出端加一信号源 V_o ，如图 10 所示。进行交流分析后，在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择 $V(Vo:+)/I(C2)$ 作输出量，显示出输出电阻的频率特性如图 11 所示。启动标尺测出在 $f=1\text{kHz}$ 处的输出电阻为 $3.8539k\Omega$

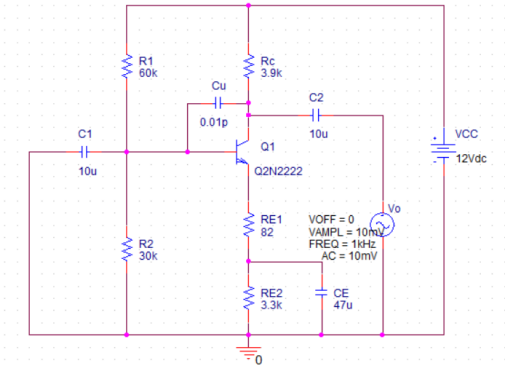


图 10 用于求输出电阻的电路图

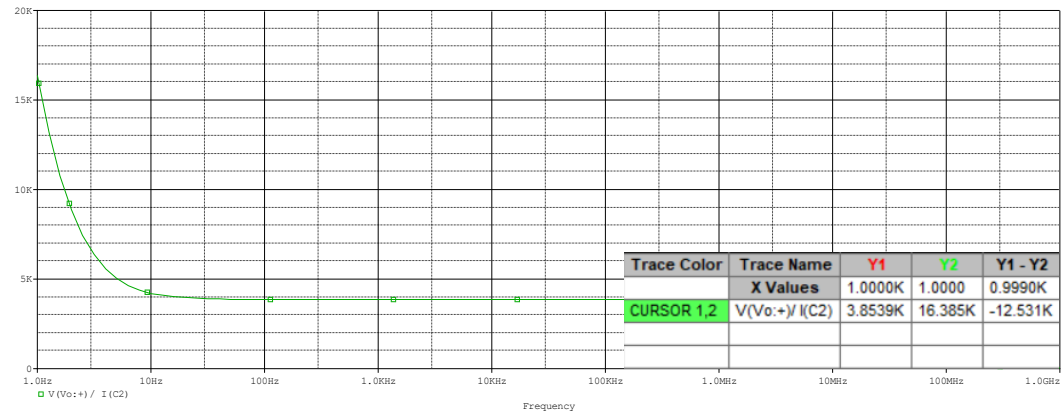


图 11 输出电阻的频率特性与游标示数

⑤计算 f_L 和 f_H ：

当 C_u 取 0.01pF 时，

中频增益为 19.977，中频增益的 0.707 倍约为 14.124，启动标尺计算，得到 $f_L=32.815\text{Hz}$ ， $f_H=17.182\text{MHz}$ 。

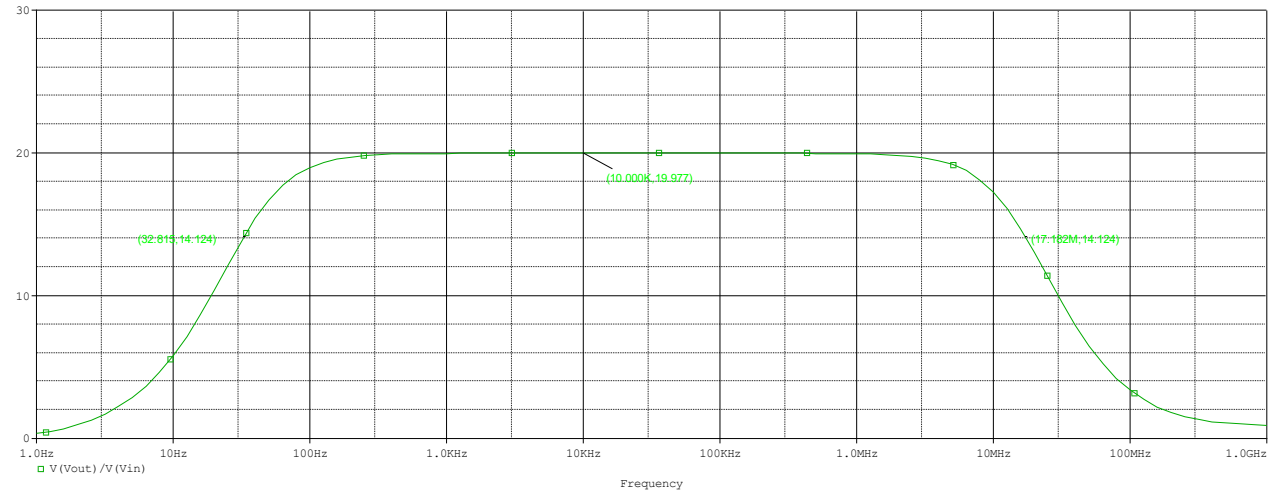


图 12 C_u 为 0.01pF 时测量上下限截止频率

当 C_u 取 104pF 时，
中频增益为 19.971，中频增益的 0.707 倍约为 14.119，启动标尺计算，得到 $f_L=32.855\text{Hz}$ ， $f_H=670.676\text{kHz}$ 。

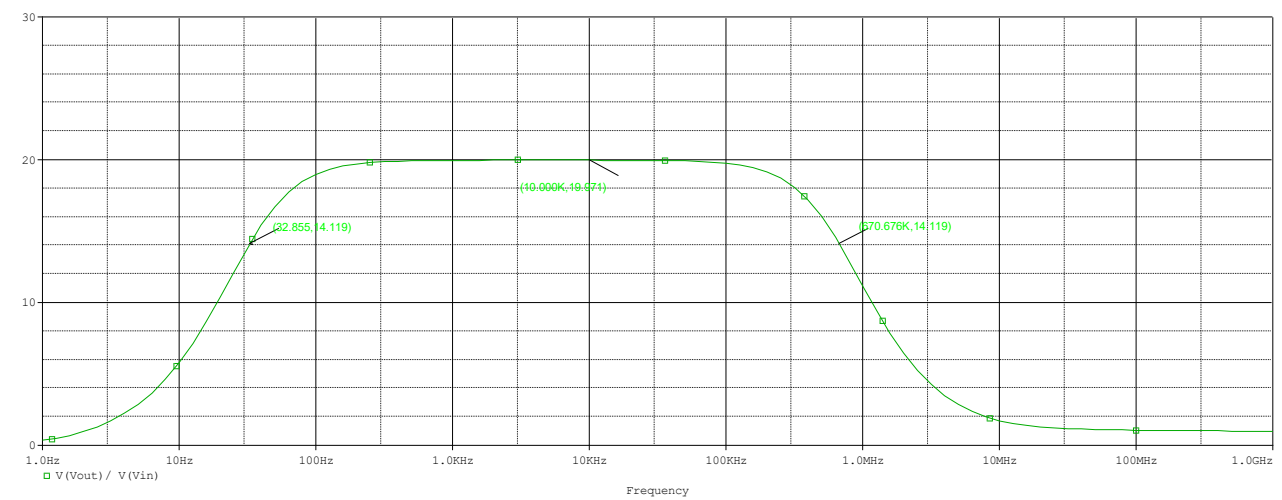


图 13 C_u 为 104pF 时测量上下限截止频率

当 C_u 取 104pF+30pF 时，
中频增益为 19.968，中频增益的 0.707 倍约为 14.117，启动标尺计算，得到 $f_L=32.935\text{Hz}$ ， $f_H=526.610\text{kHz}$ 。

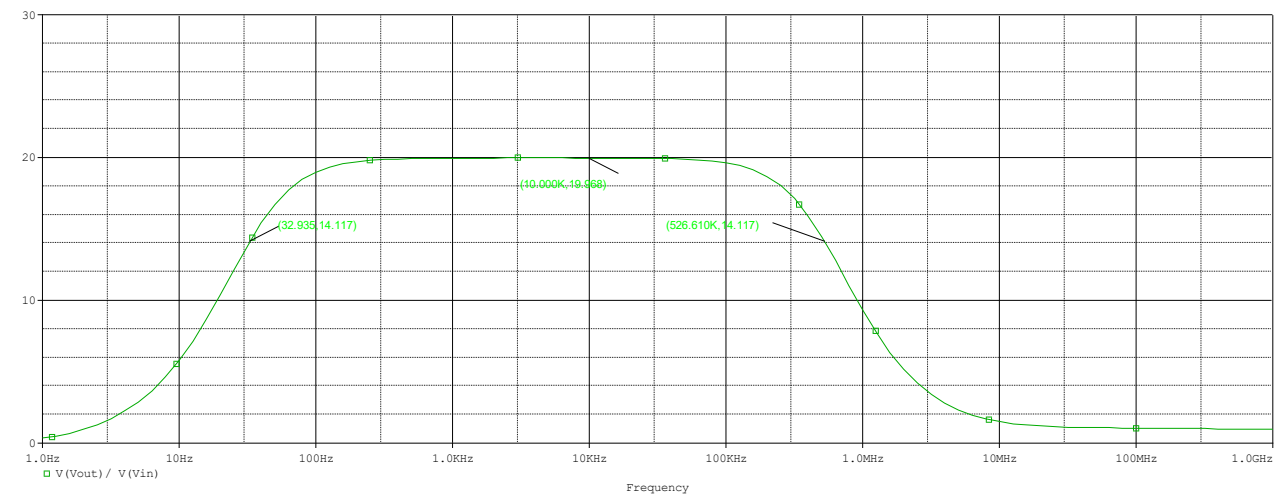


图 14 C_u 为 134pF 时测量上下限截止频率

综上所述，将验算值与仿真值进行比较：

表 1 电路设计预设值与 OrCAD 仿真值比较

	I_c (mA)	V_{CE} (V)	$ A_v $	R_i (k Ω)	R_o (k Ω)
验算值	0.945	5.12	20.10	7.989	3.900
仿真值	0.950	5.06	19.97	9.607	3.854

由此可见，除输入电阻 R_i 偏差稍大，其余各项理论验算值与 OrCAD 仿真值基本吻合。

(3) 对设计的放大电路特性进行测量:

①静态工作点的调整与测量: 按电阻电容预设值安装电路, 调整稳压电源输入电压使得 V_{CC} 为预设值 12V, 在不加输入信号的情况下, 调整 R_w 使得 I_c 为设计值 0.945mA, 测量放大电路的静态工作点, 实验数据记录在表 2 中:

表 2 放大电路特性理论估算值与测量值的比较

mA、V	I_c	V_{CE}	V_{BE}	V_B
理论估算	0.945mA	5.12V	0.62V	4V
测量值	0.946mA	5.00V	0.65V	3.96V

分析: 由表中数据可见, 放大电路的实际测量值与理论估算值吻合; 比较三极管集电极与基极的电压可知, 晶体管工作在放大区, 符合放大电路的放大需求。

②电压增益的测量: 保持 I_c 不变, 调节信号源, 使其输出 2kHz 正弦波信号, 加至放大电路输入端, 使输入电压 v_i 的幅度为 10mV, 放大电路的输入、输出波形用示波器双踪显示观察; 逐步增大输入信号幅度, 用示波器监视输出波形, 使输出波形出现失真, 测出最大不失真输出电压峰峰值。实验数据记录在表 3 中:

表 3 测量不同测试条件下放大电路的电压增益

测试条件	实测值				理论值
	V_{ip-p}	V_{op-p}	$V_{op-pmax}$	$ A_v $	$ A_v $
$R_L = \infty$, 有 C_E	20mV	666mV	5.5V	33.30V/V	35.04V/V
$R_L = \infty$, 无 C_E	20mV	22.5mV		1.13V/V	1.14V/V
$R_L = 5.1k\Omega$, 有 C_E	20mV	390mV		19.50V/V	20.10V/V

分析: 利用示波器的双踪显示观察输入、输出波形, 可以发现输入输出波形反相, 符合共射放大器的特点; 逐渐增大输入信号幅度, 输出波形在底部压缩, 故首先出现饱和失真, 最大不失真输出电压峰峰值约为 5.5V; 同时可以发现接入负载后会使得电压增益下降, 这与负载和输出电阻的分压有关, 接入负载与空载相比, 输出端分压更小, 故电压增益降低。

③输入电阻测量: 在信号源与被测放大器之间串入一个与 R_i 同一数量级的已知电阻 R , 在输出波形不失真的情况下, 分别测出 V_s 与 V_i , 则放大器的输入电阻为 $R_i = \frac{v_i}{v_s - v_i} \times R$, 实验数据记录在表 4 中:

表 4 输入电阻测量实验数据

R_i 理论值	R	V_s	V_i	R_i 实测值
7.989k Ω	5.1k Ω	40mV	25.6mV	9.07k Ω

实验测得输入电阻为 9.07k Ω .

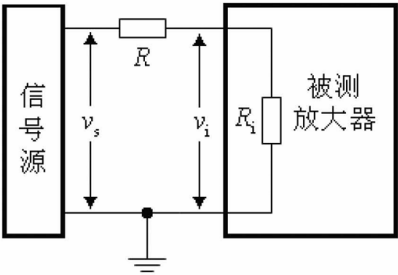


图 15 测量输入电阻原理图

④输出电阻测量：输出波形不失真的情况下，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' ，则放大器的输出电压为 $R_o = \left(\frac{V_o}{V_o'} - 1 \right) \times R_L$ ，实验数据记录在表 5 中：

表 4 输出电阻测量实验数据

R_o 理论值	V_o	V_o'	R_o 实测值
$3.90k\Omega$	666mV	390mV	$3.61k\Omega$

实验测得输出电阻为 $3.61k\Omega$ 。

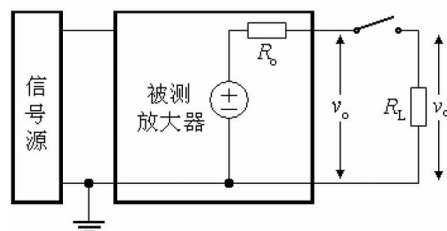


图 16 测量输出电阻原理图

⑤上下限截止频率测量：在 I_c 为设计值， R_L 接入的情况下，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 $0.707V_{op-p}$ ；保持输入信号 V_i 幅度不变，改变信号源输出频率，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 ；插入电容 $C_u=30pF$ ，测量并记录上限截止频率 $f_H(C_u)$ 。实验数据记录在表 6 中：

表 6 上下限截止频率测量值与理论值记录比较

截止频率		上限截止频率 f_H	下限截止频率 f_L
实测值	未插入 C_u	634kHz	37.4Hz
	插入 $C_u=30pF$	461kHz	37.2Hz
仿真值	插入 $C_u=0.01pF$	17.182MHz	32.815Hz
	插入 $C_u=104pF$	670.676kHz	32.855Hz
	插入 $C_u=104+30pF$	526.610kHz	32.935Hz

分析：由实验数据可知，在不考虑实验电路的分布电容的情况下，共射放大电路用 OrCAD 仿真的 f_H 比实测值高很多；在考虑实验电路的分布电容情况下，OrCAD 仿真中插入的 104pF 电容作为实验电路板的分布电容，将未插入 C_u 时的上下限频率实测值与插入 $C_u=104pF$ 时的上下限频率仿真值作比较，插入 $C_u=30pF$ 时的上下限频率实测值与插入 $C_u=104+30pF$ 时的上下限频率仿真值作比较，可以发现实测值与仿真值基本吻合；并且实验测得的下限截止频率 f_L 小于 50Hz，满足设计性能指标要求。

七、结论

本次实验通过设计、仿真与测试晶体管共射放大电路，验证了其基本工作原理与性能特征。实验结果表明：

(1) 电路设计合理，静态工作点设置正确。实测静态工作点 ($I_c \approx 0.946mA$, $V_{CE} \approx 5.00V$) 与理论估算值 ($I_c \approx 0.945mA$, $V_{CE} \approx 5.12V$) 基本吻合，晶体管工作在放大区，满足放大电路的基本要求。

(2) 电压增益符合预期，负载影响明显。在负载开路且有 CE 电容时，电压增益实测值为 33.30V/V，与理

论值 35.04V/V 接近；接入负载后增益下降至 19.50V/V，与理论趋势一致，说明输出电阻与负载之间存在分压效应。

（3）输入/输出电阻实测值与理论值较为接近。输入电阻实测为 $9.07\text{k}\Omega$ （理论 $7.989\text{k}\Omega$ ），输出电阻实测为 $3.61\text{k}\Omega$ （理论 $3.90\text{k}\Omega$ ），均在合理误差范围内，表明电路模型与实际行为基本一致。

（4）频率响应满足设计要求。实测下限截止频率 $f_L \approx 37.4\text{Hz}$ ，低于 50Hz，符合设计指标；实测上限截止频率 $f_H \approx 634\text{kHz}$ ，插入 30pF 电容后降至 461kHz，说明分布电容对高频响应具有显著影响，与仿真结果趋势一致。

（5）非线性失真观察与理解。实验中通过调节输入信号幅度，观察到输出波形首先出现饱和失真，验证了静态工作点设置对动态范围的影响，进一步理解了最大不失真输出电压的确定方法。

（6）仿真与实测结果相互印证。OrCAD 仿真结果与实测数据在静态工作点、电压增益、输出电阻及频率响应等方面基本一致，说明仿真工具能有效辅助电路设计与性能预测。

综上所述，本次实验成功实现了共射放大电路的设计与测试，加深了对晶体管放大电路工作原理、性能指标及其影响因素的深入理解，同时也掌握了电路仿真与实际调试的基本技能。