

2019~2020 学年第三学期

# 模拟电子电路实验

## 教 学 计 划 和 要 求

东南大学电工电子实验中心

2020 年 3 月

## 一、基本情况:

总学时: 32  
学时比例: 1(课内): 1(课外)  
学 分: 1 学分  
适用范围: 6、8、10、11、22 学院全体学生  
先修课程: 高等数学、物理、电路分析、电子电路基础  
实验教材: 《电子线路实践》王尧等编, 东南大学出版社出版  
实验地点: 九龙湖校区电工电子实验楼, 电子技术实验 1~8 室  
实验模式: 集中与开放、线上与线下相结合  
实验时间: 2020.3~2020.6

## 二、教学要求:

### 预习要求:

- 1、进实验室前必须完成本次实验预习报告, 内容包括:
  - 1) 实验电路功能描述、系统框图和详细设计过程;
  - 2) 实验电路原理图, 并用 MultiSim 软件进行仿真;
  - 3) 实验电路硬件搭接;
  - 4) 如果实验有预习思考题, 提交预习思考题答案。
- 2、相关实验内容可以参考中国大学 MOOC 上的《**模拟电子电路实验**》课程。
- 3、在进实验室前完成与所做实验相关的预习内容, 并将其写在实验报告的实验原理部分, 对正确性无把握的可先写在其他纸上, 完成实验后再补到实验报告上。
- 4、实验电路必须在进实验室前完成预搭接, 在实验室以电路调试为主。
- 5、预习中有问题可以登录电工电子实验中心的网站查找解答或提出问题。电工电子实验中心网址为: <http://eae.seu.edu.cn/>, 预习时请访问该平台以了解您准备完成的实验内容是否有变动、提示或其他通知, 也可以直接和您的带班教师联系, 具体联系方式可询问各自的带班教师。

### 实验要求:

- 1、实验采用集中授课+开放、线上+线下模式, 实验前请仔细阅读开放实验规章制度, 并在以后的实验中认真遵守。
- 2、每次实验要记得带校园卡、元器件、单股连接线、丁字线和所发的面包板。丁字线和面包板请妥善保管, 勿丢失或损坏, 否则将照价赔偿。
- 3、进入实验室时, 请在刷卡机上出示您的校园卡, 在刷卡机分配的实验室和实验座位上完成实验, 严禁窜座。
- 4、进入实验座位后请先检查自己座位上的仪器, 如有缺失和损坏请及时通知值班教师处理, 实验过程中如果发生仪器故障, 也请和值班教师联系, 值班教师检查确认后可以更换, **严禁**自己用其他实验座位上的仪器更换。
- 5、按实验设计方案搭接和测试电路, 认真检查确保无误后方可通电测试。
- 6、认真记录实验数据和实验波形, 所有数据和波形都要分析判断, 并与仿真波形对比, 确保其正确。
- 7、要求实物验收的实验内容, 完成并记录所有实验数据后, 请指导老师验收, 验收通过后方可拆除电路结束实验。
- 8、实验过程中遇到故障要独立思考, 耐心查找故障原因并排除, 记录故障现象、排除故障的过程和方法。
- 9、实验中若发生异常现象, 应立即切断电源, 并通知指导老师处理。如有元器件损坏, 可到金智楼 412 室购买。

- 10、每个开放实验室的教室前方配有电烙铁，焊接结束后，请务必拔掉电烙铁电源。
- 11、开放实验每次至少要完成一项实验内容，单次实验时间不少于1个小时。
- 12、实验中请勿随意离开实验室，如确实有特殊情况请向指导教师请假。
- 13、实验完成后请将仪器归位并关闭仪器电源、整理线缆、打扫干净实验桌面，然后刷卡下机。

**实验报告要求（电子实验报告 <http://eae.seu.edu.cn>）：**

- 1、实验报告应该包括以下几个部分：
  - 1) 实验目的和要求；
  - 2) 实验原理，请不要大量抄书上已有的内容，实验原理包括实验电路的设计过程、系统框图、原理图、测试方案等，要求在实验前完成；
  - 3) 实验仪器，实验中用到的仪器设备；
  - 4) 实验记录，记录实验具体步骤、原始数据、实验过程、实验中遇到的故障现象、排除故障的过程和方法等；
  - 5) 实验分析，对实验结果进行分析比对；
  - 6) 实验思考题，如有，提交思考题答案；
  - 7) 实验小结，总结实验完成情况，对设计方案和实验结果做必要的讨论，简述实验收获和体会；
  - 8) 参考资料，记录实验过程阅读的有关资料，包含资料名称、作者等。
- 2、模拟电路实验结果验证一般包括波形验证、功能验证、实验分析。
  - 1) 波形验证结果，要求记录在坐标纸上，并标注波形的各项参数，记录的时候注意多路波形之间的时序关系；
  - 2) 功能验证结果，要求用表格记录；
  - 3) 记录实验波形和实验数据之后，一定要对其进行**实验分析**。
- 3、实验报告必须在指定时间完成并提交。

**三、实验教学计划：**

**6、8、11 实验教学计划**

教学周	时数	实验内容	实验方式
第6周	3	运算放大器的基本应用（MOOC 实验1）	在线教学+仿真
第7周	3	运算放大器的基本应用续（MOOC 实验2、3）	在线教学+仿真
第8周	3	三极管放大电路设计（MOOC 实验10）	在线教学+仿真
第9周	3	三极管放大电路设计续（MOOC 实验11、12）	在线教学+仿真

**10、22 实验教学计划**

教学周	时数	实验内容	实验方式
第6周	3	三极管放大电路设计（MOOC 实验10）	在线教学+仿真
第7周	3	三极管放大电路设计续（MOOC 实验11、12）	在线教学+仿真
第8周	3	运算放大器的基本应用（MOOC 实验1）	在线教学+仿真
第9周	3	运算放大器的基本应用续（MOOC 实验2、3）	在线教学+仿真

#### 四、考核方法:

本课程最终成绩由每个实验的成绩和期末考试成绩组成。期末考试采取给出题目,设计并搭试电路的模式。具体成绩组成如下:

实验综合成绩=平时实验成绩 80%+期末考试成绩 20%

平时每个实验的评分组成如下:

实验内容	MOOC 在线测验	课堂验 (MultiSim 仿真结果)	在线电子报告	选做 (课堂验收)
运算放大器的基本应用	30%	40%	30%	加 20 分
三极管放大电路设计	30%	40%	30%	加 20 分

★注: 1) 期末考试卷面分数低于 45 分, 实验综合成绩不及格。

2) 选做实验, 同时要求仿真和东南在线实验平台上完成实物实验, 加分 20 分。

3) 东南在线网址: <http://remotelab.top/>, 推荐使用谷歌浏览器 (chrome), 也可以使用 QQ、360 浏览器的极速模式。如果使用东南在线时有疑问可以加入 QQ 群 1029275373。

五、模拟电子电路实验 MOOC 学习请扫描如下课程二维码加入课程学习, 完成 MOOC 对应实验的测试, 同时昵称请修改为 “seu+学号+姓名”。

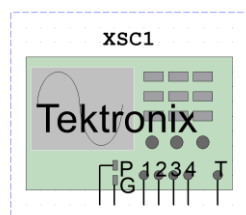


网址: [www.icourse163.org](http://www.icourse163.org), 搜索由东南大学堵国樑教授开设的《模拟电子电路实验》, 点击参加学习。

#### 六、发放清单

- 1、教学计划与内容 (6-9 周)
- 2、器件清单 (按照器件清单选择元器件进行仿真)
- 3、电子报告使用手册
- 4、《电子线路实践》电子书
- 5、<https://pan.seu.edu.cn:443/#/link/5B7920EE5225656B8E1CF3169A39588>  
3 仿真软件下载地址

七、建议用 MultiSim 仿真时, 示波器选择 TEK, 这样让学生熟悉实物示波器, 开学后用教室示波器不陌生。



# 实验一 运算放大器的基本应用

## 一、 基本信息

实验时数： 6 学时+课外开放、线上与线下  
实验检查： 预习、预搭检查，部分实验验收，提交实验报告

## 二、 实验目的

1. 熟练掌握反相比例、同相比例、加法、减法等电路的设计方法；
2. 熟练掌握运算放大电路的故障检查和排除方法；
3. 了解运算放大器的主要直流参数（输入失调电压、输入偏置电流、输入失调电流、温度漂移、共模抑制比，开环差模电压增益、差模输入电阻、输出电阻等）、交流参数（增益带宽积、转换速率等）和极限参数（最大差模输入电压、最大共模输入电压、最大输出电流、最大电源电压等）的基本概念。
4. 熟练掌握运算放大电路的增益、幅频特性、传输特性曲线的测量方法。

## 三、 实验内容

### 1. 实验内容一（见 M00C 实验 1）：

反相输入比例运算电路各项参数测量实验（预习时，查阅  $\mu A741$  运放的数据手册，自拟表格记录相关的直流参数、交流参数和极限参数，解释参数含义）。

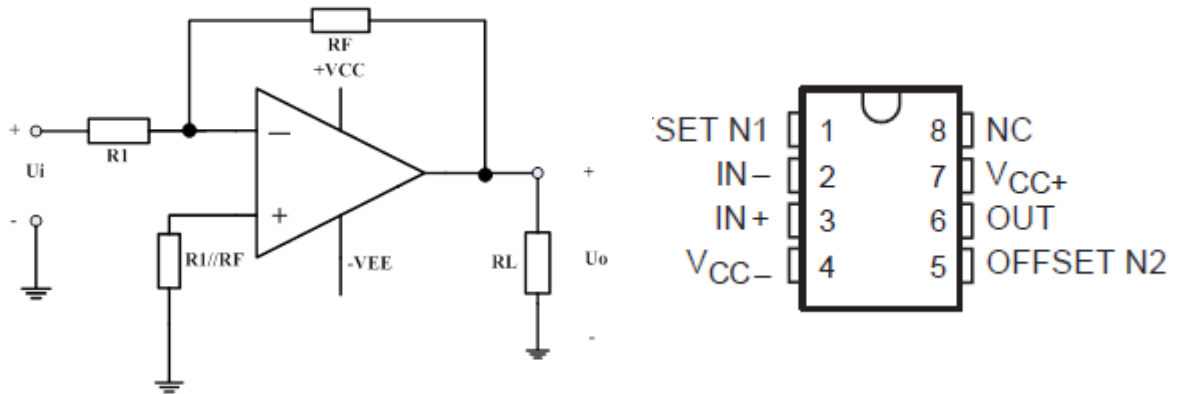


图 1.1 反相输入比例运算电路

$\mu A741$  管脚图

- (1) **直流特性测量：**图 1.1 中电源电压 $\pm 15V$ ， $R_1=10k\Omega$ ， $R_F=100k\Omega$ ， $R_L=100k\Omega$ ， $R_P=10k/100k\Omega$ 。按图连接电路，输入直流信号  $U_i$  分别为  $-2V$ 、 $-0.5V$ 、 $0.5V$ 、 $2V$ ，用万用表测量对应不同  $U_i$  时的  $U_o$  值，列表计算  $A_u$  并和理论值相比较。其中  $U_i$  通过电阻分压电路产生。（教师课堂验收一组输入与输出波形即可）

直流特性测量记录表 (MultiSim 仿真)			
U <sub>i</sub> /V	U <sub>o</sub> /V	A <sub>u</sub>	
		MultiSim 仿真值	理论值
-2			
-0.5			
0.5			
2			

- (2) **交流特性测量:** 设定输入信号频率为 1kHz 的正弦波, 调整不同的信号幅度, 用双踪示波器观察并记录输入输出波形, 在输出不失真的情况下测量交流电压增益, 并和理论值相比较。注意此时不需要接电阻分压电路。(教师课堂验收一组输入与输出波形即可)

交流特性测量记录表 (MultiSim 仿真)				
U <sub>i</sub>	U <sub>o</sub>		增益	
峰峰值 (mVpp)	峰峰值 (mVpp)	波形	A <sub>u</sub>	误差
200				
400				
4000				
		(请测量记录最大不失真输出波形)		

- (3) **增益改变的测量:** 通过改变反馈电阻或输入电阻, 就可以调整放大器增益, 这也是做可控增益放大器的一个基本电路结构。

增益改变的测量记录表 (MultiSim 仿真)						
R <sub>1</sub> KΩ	R <sub>F</sub> KΩ	U <sub>i</sub> mVpp	U <sub>o</sub> mVpp	A <sub>u</sub> 测量值	A <sub>u</sub> 理论值	误差
10	100	100				
10	200	100				
20	100	100				

- (4) **运放特性测量——最大输出电压:** 电源电压改为±12V, 重复实验(2), 并对实验结果进行分析比较, 表格自拟。
- (5) **运放特性测量——最大输出电流:** 重新加负载(减小负载电阻 R<sub>L</sub>), 使 R<sub>L</sub>=220Ω, 测量最大不失真输出电压, 并和 R<sub>L</sub>=100 kΩ 数据进行比较, 分析数据不同的原因。(提示: 考虑运算放大器的最大输出电流)。

### (6) 电压传输特性的测量

图 1.1 中电源电压  $\pm 15\text{V}$ ,  $R_1=10\text{k}\Omega$ ,  $R_F=100\text{k}\Omega$ ,  $R_L=100\text{k}\Omega$ ,  $R_P=10\text{k}\Omega/100\text{k}\Omega$ 。用示波器的 X-Y 方式, 选择合理的交流输入信号电压, 选择合理的输入信号频率, 选择示波器输入耦合方式, 选择示波器 X-Y 显示方式 (选择 X、Y 方式之前进行原点校准), 测出反相输入比例运算电路的电压传输特性。并记录电压传输特性图。(教师课堂验收电压传输特性)

### (7) 选做 (教师课堂验收):

设计一个同相输入比例运算电路, 要求其放大倍数为 11。完成同相比例放大电路的设计及仿真, 并在东南在线实验平台做实验。测量同相比例放大电路的交、直流特性。测量运放的最大输出电压和最大输出电流。拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形。

★注意: 东南在线的运放为固定的正负 5V 电源, 同时注意东南在线上可选择的电阻, 最终完成实验。

### (8) 实验内容一的电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 1 单元的作业中。

## 2. 实验内容二 (见 MOOC 实验 2):

### (1) 设计一个减法电路, 满足 $u_o = 3u_1 - 2u_2$ , 预习时设计好电路图, 并用 Multisim 软件

仿真, 完成减法电路的设计及仿真测量; 按仿真设计的电路参数完成电路的连接; 用不同的直流电压输入测量输出与输入的关系; 用一个方波信号和一个正弦波信号观察波形叠加; 改变输入波形幅度观察输出波形变化规律; 其他自主测量与发现 (例如输入幅度、频率变化, 输入电阻对测量的影响……); 拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形、撰写实验报告。

#### 实验指导:

a) 直流减法功能测量: 两个输入端加上不同的直流电压 (如:  $U_1$  加上 0.1V,  $U_2$  加上 0.5V;  $U_1$  加上 5V,  $U_2$  加上 -2V 等), 用万用表测量输出电压, 数据记录在直流减法功能测量记录表中。

直流减法功能测量记录表

	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组
$U_1/\text{V}$					
$U_2/\text{V}$					
$U_o/\text{V}$ (理论值)					
$U_o/\text{V}$ (测量值)					

#### 实验结果分析:

- 有明显不满足减法关系的测量结果, 是什么原因?
- 如果用负电压输入, 减法电路可以实现加法功能?

b) **交流减法功能测量**: 两个输入端加上不同的交流信号 (如:  $U_1$  加上一个方波, 频率为 1kHz, 幅度为 1V;  $U_2$  加上一个正弦波, 频率为 5kHz, 幅度为 200mV 调整不同的输入信号周期), 用示波器观察输入、输出波形, 画出波形图并与理论值比较, 记录在交流减法功能测量记录表中。实验中如波形不稳定, 可微调  $U_2$  的频率。(教师课堂验收一组输入与输出波形即可)

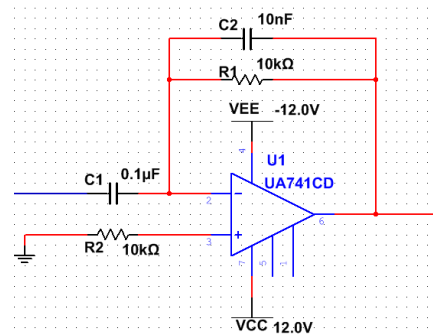
交流减法功能测量记录表

输入	第一组实验波形	误差	第二组实验波形	误差
$U_1$				
$U_2$				
$U_0$				

- c) 其他自主测量与发现 (例如输入幅度、频率变化, 输入电阻对测量的影响……);  
 (2) 实验内容二的电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 2 单元的作业中。

3. 实验内容三 (见 MOOC 实验 3):

(1) **微分电路**: 用  $\mu A741$  运放, 按图示电路结构和参数:  $R_1=10k\Omega$ ,  $R_2=10k\Omega$ ,  $C_1=0.1\mu F$ ,  $C_2=10nF$ 。连接好电路, 确保正确无误, 运放使用正负 12V 电源供电, 检查正确后可以加电开始实验。



- a) **微分电路性能测量**: 在微分电路的输入端加上不同的信号波形, 利用双踪示波器观察输入和输出的波形, 记录波形及参数, 分析波形之间的关系。  
 b) **微分电路性能研究**: 改变反馈电阻  $R_1$ , 由原来的  $10k\Omega$  改为  $20k\Omega$ , 可以调整微分电路的时间参数, 观察波形的变化, 记录波形相关参数, 分析实验结果; 如果电容  $C_2$  选择不合理, 会导致输出波形发生何种变化? 如果  $C_2$  由  $10nF$  改为  $1\mu F$ , 观察波形的变化, 记录波形相关参数, 分析实验结果。(教师课堂验收一组输入与输出波形即可)

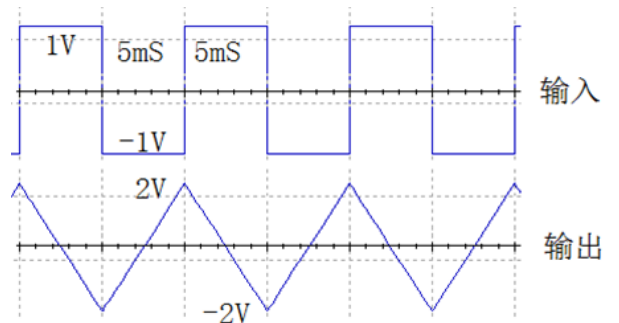
微分电路性能测量与研究记录表

输入波形	方波				
	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=1\mu F$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$
$U_i$					
$U_0$					



输入波形	三角波				
输入波形参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=1\mu F$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$
$U_i$					
$U_o$					
输入波形	正弦波				
输入波形参数	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=20k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=100Hz 幅度=1Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=1\mu F$	频率=100Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$	频率=200Hz 幅度=2Vpp $R_1=10k\Omega$ $C_2=10nF$
$U_i$					
$U_o$					

(2) **积分电路**：设计一个波形变换电路，由输入方波转换成输出三角波，波形参数如图所示。完成转换电路的设计及仿真测量；按仿真设计的电路参数完成电路的连接；如果需要得到输出三角波不同的斜率或输出幅度，如何调整参数；如果输入波形的占空比不为0.5，输出波形会发生什么变化？其他自主测量与发现（输出波形顶部或底部被削平的原因，工作频率和积分关系……）；拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形。



(3) **选做（教师课堂验收）**：

设计一个运算电路，满足运算公式  $u_o(t) = \frac{101}{100}u_i(t) + 100\int u_i(t)dt + \frac{1}{10000}\frac{du_i(t)}{dt}$

- 写出具体的设计过程，在东南在线实验平台上分别测量：比例-积分，比例-微分，积分-微分，比例-积分-微分运算电路的波形。并进行分析比较，各算式系数对波形的影响。
- 如何只用两个运放实现这个运算公式？比例、积分、微分的系数可以有所不同，请考虑不同的系数对设计输出有何影响？写出具体的设计过程，在东南在线实验平台上测量。

(4) 实验内容三的电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 3 单元的作业中。

## 四、 实验要求

1. 用运算放大器设计反比例、同比例、加法、减法、积分、微分等电路的方法及实验测量技能。
2. 在 Multisim 软件平台中对所设计的电路作仿真，调整参数。其中阻容元件参数必须符合电阻、电容参数规范。
3. 在面包板上搭试、调试电路。

## 五、 预习思考题

1. 查阅  $\mu A741$  运放的数据手册，自拟表格记录相关的直流参数、交流参数和极限参数，解释参数含义，必须写在实验报告中。

## 六、 设计指导

1. 分压电路产生方法

如图 1.2 所示，其中  $U_i$  通过电阻分压电路产生，串接固定电阻  $510\Omega$  的目的是限流，避免烧坏器件和电源。

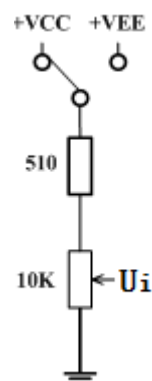


图 1.2 分压电路

2. 电压增益（电压放大倍数  $A_u$ ）测量方法

电压增益是电路的输出电压和输入电压的比值，包括直流电压增益和交流电压增益。

实验中一般采用万用表的直流档测量直流电压增益，测量时要注意表笔的正负。

交流电压增益测量要在输出波形不失真的条件下，用交流毫伏表或示波器测量输入电压  $U_i$ （有效值）或  $U_{im}$ （峰值）或  $U_{ipp}$ （峰-峰值）与输出电压  $U_o$ （有效值）或  $U_{om}$ （峰值）或  $U_{opp}$ （峰-峰值），再通过计算可得。测试框图如图 1.3 所示，其中示波器起到了监视输出波形是否失真的作用。

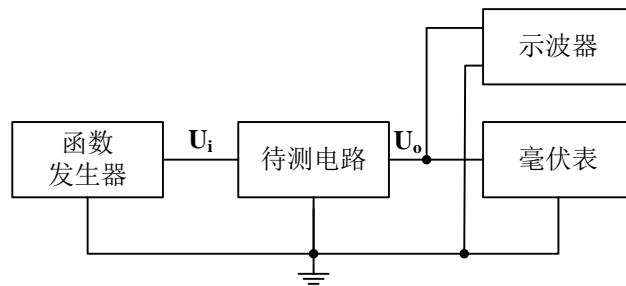


图 1.3 电压增益（电压放大倍数  $A_u$ ）测量

### 3. 用示波器测量电压传输特性曲线的方法

双端口网络的输出电压值随输入电压值的变化而变化的特性叫做电压传输特性。电压传输特性在实验中一般采用两种方法进行测量。一种是手工逐点测量法，另一种是采用示波器 X-Y 方式进行直接观察。

**手工逐点测量法：**可以在输入端加一个输入信号，逐步改变输入端电压，每改变一次记录一个输出电压值，最后把所有测量所得数据记录在坐标纸上，所有的点连接起来就是电压传输特性曲线。这种测量方式最大的优点是设备简单，只要有信号源和电压表就可以了，缺点是繁琐，同时由于是取有限的点进行测量，有可能丢失比较重要的信息点，所以测量精度有限。

**示波器 X-Y 方式直接观察法：**是把一个电压随时间变化的信号（如：正弦波、三角波、锯齿波）在加到电路输入端的同时加到示波器的 X 通道，电路的输出信号加到示波器的 Y 通道，利用示波器 X-Y 图示仪的功能，在屏幕上显示完整的电压传输特性曲线，同时还可以测量相关参数。测量方法如图 1.4 所示。

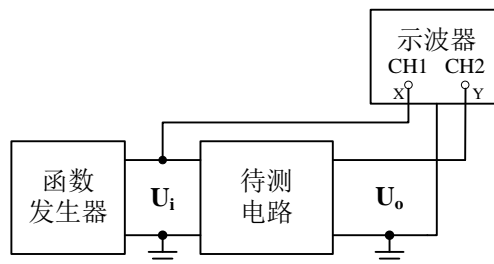


图 1.4 电压传输特性曲线测量

具体测量步骤如下：

- (1) 选择合理的输入信号电压，一般与电路实际的输入动态范围相同，太大除了会影响测量结果以外还可能会损坏器件；太小不能完全反应电路的传输特性。
- (2) 选择合理的输入信号频率，频率太高会引起电路的各种高频效应，太低则使显示的波形闪烁，都会影响观察和读数。一般取 50~500Hz 即可。
- (3) 选择示波器输入耦合方式，一般要将输入耦合方式设定为 DC，比较容易忽视的是在 X-Y 方式下，X 通道的耦合方式是通过触发耦合按钮来设定的，同样也要设成 DC。
- (4) 选择示波器显示方式，示波器设成 X-Y 方式，对于模拟示波器，将扫描速率旋钮逆时针旋到底就是 X-Y 方式；对于数字示波器，按下“Display”按钮，在菜单项中选择 X-Y。
- (5) 进行原点校准，对于模拟示波器，可把两个通道都接地，此时应该能看到一个光

点，调节相应位移旋钮，使光点处于坐标原点；对于数字示波器，先将 CH1 通道接地，此时显示一条竖线，调节相应位移旋钮，将其调到和 Y 轴重合，然后将 CH1 改成直流耦合，CH2 接地，此时显示一条水平线，调节相应位移旋钮，将其调到和 X 轴重合。

## 七、考核要求

1. 预习、预搭；
2. 在线实验测验成绩、参与在线讨论质量；
3. 实验报告（要求见教学计划）。把上传到 MOOC 实验上的 3 份报告整合成一个文档提交给带课老师。

## 八、注意事项

1. MultiSim 仿真选择器件不可以选择理想运放
2. 要注意运放器件的管脚顺序和电解电容的极性。
3. 使用运算放大器时要注意不能超过各项参数的极限值，如最大电源电压、最大输入电压、最大输出电流等。电源电压应预先调到所需的电压值后再接入到实验电路中，同时请注意正负电源的接法。
4. 部分实验需要输入可调的直流电压，这可通过由电位器串接电阻组成分压电路来实现，串接固定电阻的目的是限流，避免烧坏器件和电源。
5. 仪器和电路的接地：在电路的调试过程中，如果仪器的接地端连接不正确，或者接触不良，会直接影响测量精度，甚至影响到测量结果的正确与否。在实验中直流稳压电源的“地”、示波器的“地”、函数信号发生器、交流毫伏表的“地”都必须和电路的“地”连接在一起，否则会导致信号不正确。
6. 数字存储示波器在显示小信号时干扰比较大，可在采样菜单中选择“平均”以提高波形显示清晰度。
7. 加法器设计时，要注意信号源的输出电阻对电路的影响。

# 实验二 三极管放大电路设计

## 一、 基本信息

**实验时数:** 6 学时+课外开放、线上和线下  
**实验检查:** 预习、预搭检查, 部分实验验收, 提交实验报告

## 二、 实验目的

1. 掌握单级放大电路的工程估算、安装和调试;
2. 了解三极管各项基本器件参数、工作点、偏置电路、输入阻抗、输出阻抗、增益、幅频特性等的基本概念以及测量方法;
3. 掌握级联电路设计方法。
4. 掌握负反馈对放大电路特性的影响。

## 三、 实验内容

### 1. 实验内容一 (见 MOOC 实验 10):

根据图 2.1 所示电路, 研究静态工作点变化对放大器性能的影响 (预习时, 查阅三极管 9013 的数据手册, 自拟表格记录相关的参数, 解释参数含义)。仿真时, Multisim 器件库里没有 9013, 大家可以用 2N2222 来替代 9013 进行仿真。

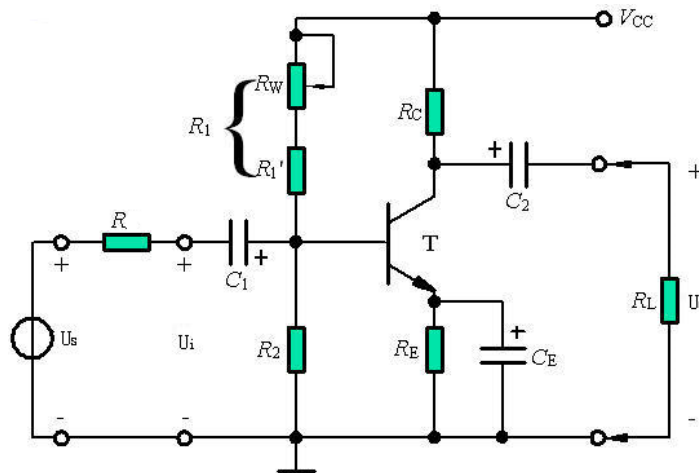


图 2.1 射级偏置电路

利用三极管 9013 设计一个分压式偏置共发射极放大电路。要求: 已知:  $V_{CC}=12\text{ V}$ ,  $U_i=5\text{ mV}$ ,  $R_L=3\text{ k}\Omega$ ,  $R=1\text{ k}\Omega$ , 设计指标要求:  $A_u>50$ ,  $R_i>1\text{ k}\Omega$ ,  $R_o<3\text{ k}\Omega$ ,  $f_L<100\text{ Hz}$ ,  $f_H>100\text{ kHz}$ 。理解三极管 9013 的数据手册, 掌握关键参数的意义并能正确使用; 完成仿真设计并正确连接电路; 调整合适的静态工作点; 测量放大电路放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大输出幅度等; 其他性能测量 (如不同工作点对放大电路性能的影响、不同的电源电压对放大电路性能的影响。。。) 拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形 (实验内容一的电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 10 单元的作业中)。

**实验指导：**（可以按照如下步骤进行实验的各项数据测量）

**1) 静态工作点的调整 and 测量：**调整  $R_w$ ，使静态集电极电流  $I_{CQ}=1\text{mA}$ ，通过测量集电极或发射极电阻两端压降确定，测量静态时晶体管集电极—发射极之间电压  $U_{CEQ}$ 。调整不同的静态电流，记入表中。

静态工作点电流 $I_{CQ}$ (mA)		1	2
输入端 接地	$U_{BQ}$ (V)		
	$U_{CQ}$ (V)		
	$U_{EQ}$ (V)		
	$U_{CEQ}$ (V)		

**2) 放大性能的测量：**在放大器输入端输入频率为  $f=1\text{kHz}$  的正弦信号，调节信号源输出电压  $U_s$  使  $U_i=5\text{mV}$ ，测量  $U_s$ 、 $U_o$  和  $U_o'$ （负载开路时的输出电压）的值并填于表中。注意：用双踪示波器监视  $U_o$  及  $U_i$  的波形时，必须确保在  $U_o$  基本不失真时读数（教师选择一个静态工作点进行课堂验收）。

静态工作点电流 $I_{CQ}$ (mA)		1	2
输入信号 $U_i=5\text{mV}$	$U_s$ (mV)		
	$U_o$ (V)		
	$U_o'$ (V)		

**3) 静态工作点对输出波形的影响：**适当加大输入信号，调整  $R_w$ ，使输出电压波形出现截止失真，绘出失真波形，并将测量值记录表中。使输出电压波形出现饱和失真，绘出失真波形，并将测量值记录表中。

		截止失真	饱和失真	$R_w$ 变化对失真的影响
测量值	$U_{BQ}$ (V)			
	$U_{CQ}$ (V)			
	$U_{EQ}$ (V)			
	波形			——

**4) 测量放大器的最大不失真输出电压：**分别调节  $R_w$  和  $U_s$ ，用示波器观察输出电压  $U_o$  波形，使输出波形为最大不失真正弦波。测量并记录此时静态集电极电流  $I_{CQ}$  和输出电压的峰峰值  $U_{OPP}$ 。

测量值	记录数据
$U_{BQ}$ (V)	
$U_{CQ}$ (V)	

$U_{EQ}$ (V)	
$U_{OPP}$ (V)	

5) **输入电阻的测量:** 输入电阻的测量方法一般是在待测电路的输入端串接一个电阻  $R$ ,  $R$  的阻值大小和待测电路输入电阻相当, 这样测量的误差比较小。用信号源加入一个信号  $U_s$ , 用毫伏表或示波器分别测量出所加电阻  $R$  两端的电压  $U_s$  和  $U_i$ , 电路的输入电阻为:  $R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R$  (注意: 输出用示波器检测, 保证放大电路在不失真的情况下测量输入电阻)。

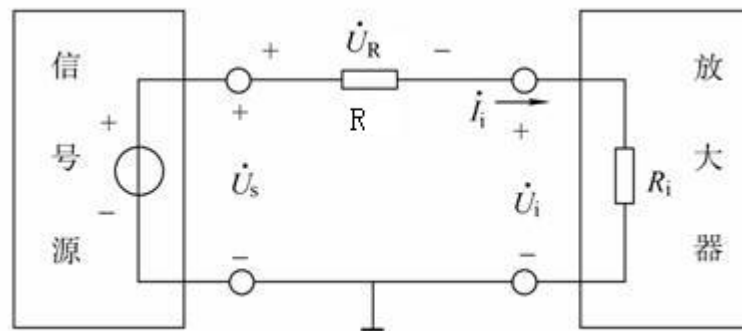


图 2.2 放大器输入阻抗测量原理图

静态工作点电流 $I_{CQ}$ (mA)		1	2
输入信号 $U_i=5\text{mV}$	$U_s$ (mV)		
	$R_i$ ( $\Omega$ )		

6) **输出电阻的测量:** 输出电阻反映了放大电路的带负载能力, 常用的测量方法是在输出端测量不带负载电阻  $R_L$  时候的输出端电压  $U_o'$  和带上负载电阻  $R_L$  后的输出电压值  $U_o$ , 放大电路的输出电阻为  $R_o = \frac{U_o' - U_o}{U_o} R_L$  (输出用示波器检测, 保证放大电路在不失真的情况下测量输入电阻)。(教师课堂验收)

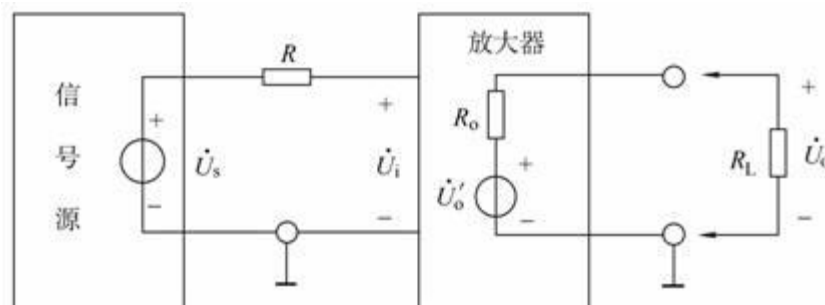


图 2.3 放大器输出阻抗测量原理图

静态工作点电流 $I_{CQ}$ (mA)		1	2
输入信号 $U_i=5\text{mV}$	$U_o$ (V)		
	$U_o'$ (V)		
	$R_o$ ( $\Omega$ )		

★注：本实验完成后不要拆掉，下一个实验还需要测量相关参数。

## 2. 实验内容二（见 MOOC 实验 11）：

设计 RC 耦合共发射极放大电路，用软件完成频率特性的仿真测量。完成放大电路的频率特性测量，记录放大倍数和频率的对应关系，画出幅频特性曲线；按仿真设计的电路参数完成电路的连接；如果去掉发射极旁路电容，合理调整电路参数，测量下限频率的变化，分析原因。其他（如去掉负载  $R_L$  对频率特性的影响，加大或减小耦合电容对频率特性的影响。。。）拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形（实验内容二的电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 11 单元的作业中）。

**实验指导：**（可以按照如下步骤进行实验的各项数据测量）：

**1) 放大电路频率特性测量与研究：**连接好电路，确保正确无误，调整电源值为 12V，调整电路的静态工作点，使  $I_{CQ}=2\text{mA}$ ，开始频率特性的测量，使用扫频法和逐点法测量放大电路的频率，对比两种测量结果，并把实验数据记录在表格中。（验收表格生成图，教师课堂验收）

波特仪扫频法： $f_L=$   $f_M=$   $f_H=$

逐点法：

逐点法测量放大电路的频率记录表

$f/\text{KHz}$	$f_1=$	$f_2=$	$f_L=$	$f_3=$	$f_M=$	$f_4=$	$f_H=$	$f_5=$	$f_6=$
$U_o/V$									
<b>Au</b>									

放大电路的频率特性图：

扫频法与逐点法对比得到结论：

**2) 电路参数对频率特性的影响：**改变发射极旁路电容  $C_e$ ，由原来的 100 $\mu\text{F}$  调整为 33 $\mu\text{F}$ ，再测量电路的频率特性，研究电路参数对频率特性的影响，类似的实验方法也可以测量分析耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  对电路下限频率的影响，将实验结果记录在表格中。

电路参数对频率特性的影响记录表

$C_e=33\mu\text{F}$	$f_L=$	$f_M=$	$f_H=$
---------------------	--------	--------	--------

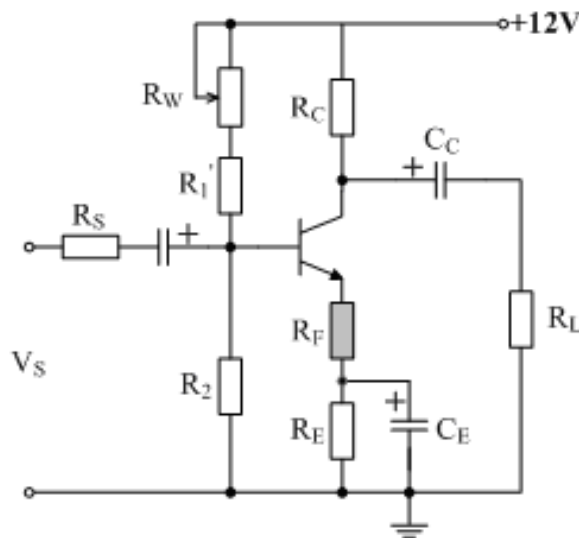


$C_1=$	$f_L=$	$f_M=$	$f_H=$
$C_2=$	$f_L=$	$f_M=$	$f_H=$

### 3. 实验内容三（见 M00C 实验 12）:

#### (1) 负反馈对放大器性能的影响

在实验电路中增加反馈电阻  $R_F=10\ \Omega$ （如图所示），构成电流串联负反馈放大器，调整  $I_{CQ}=x$ （设计值），测量该电路的增益、输入阻抗、输出阻抗、下限频率  $f_L$ 、上限频率  $f_H$ 、带宽  $BW$ ，并和前面实验测量的结果进行分析比较。（教师课堂验收）



负反馈放大电路

**实验指导：**引入交流负反馈后，放大器的放大倍数将下降，其表达式为  $A_F = \frac{A}{1+AF}$ 。

式中， $F$  为反馈网络的传输系数； $A$  为无负反馈时的放大倍数。引入负反馈后通频带加宽，负反馈放大器的上限频率  $f_{HF}$  与下限频率  $f_{LF}$  的表达式分别为  $f_{HF}=(1+AF)f_H$  和

$$f_{LF} = \frac{f_L}{1+AF}$$

。引入负反馈还会改变放大器的输入电阻与输出电阻，其中并联负反馈能降低输入阻抗，串联负反馈能提高输入阻抗，电压负反馈使输出阻抗降低，电流负反馈使输出阻抗升高。

#### (2) 选做（教师课堂验收）:

设计一个分别由共射（CE）和共集（CC）构成的两级放大电路，在 Multisim 上完成仿真并在东南在线上完成测量。要求满足：放大倍数  $>50$  倍（设共射和共集的输出电压分别为  $U_{O1}$  和  $U_O$ ）

写出具体设计过程，算电路参数以及  $A_u$  的理论值。设置合适的静态工作点，

在放大器输入端输入频率为  $f=1\text{kHz}$  的正弦信号，调节信号源输出电压  $U_S$  使  $U_i=5\text{mV}$ ，用示波器双踪显示  $U_i$ 、 $U_o$  的波形，在输出波形不失真的情况下，记录波形，测量  $U_O$  和  $U_O'$ （负载开路时输出电压）并计入表中。根据测量结果计算放大器的  $A_u$ ，与理论值比较。

**实验指导：**（可以按照如下步骤进行实验的各项数据测量）：

**1) 静态工作点的测量和调试：**

静态工作点测量记录表		
设计值	第一级	第二级
	$I_{DQ}=2\text{mA}$	$I_{DQ}=2\text{mA}$
测量值	$U_{CQ}=\quad\quad\text{V}$	$U_{BQ}=\quad\quad\text{V}$
	$U_{EQ}=\quad\quad\text{V}$	$U_{EQ}=\quad\quad\text{V}$
	$I_{CQ}=\quad\quad\text{mA}$	$I_{CQ}=\quad\quad\text{mA}$

2) 以频率为  $1\text{kHz}$  的正弦波为输入信号，测量电路的交流性能，将实验数据填入放大倍数测量记录表中。

放大倍数测量记录表			
增益	第一级	第二级	总增益
Au	$U_i=\quad\quad\text{mV}$	$U_{O1}=\quad\quad\text{mV}$	$U_i=\quad\quad\text{mV}$
	$U_{O1}=\quad\quad\text{mV}$	$U_o=\quad\quad\text{mV}$	$U_o=\quad\quad\text{mV}$
Au (dB)	$A_{u1}=\quad\quad$	$A_{u2}=\quad\quad$	$A_u=\quad\quad$

3) 利用逐点测量法或扫频仪测量法，测量多级放大电路的频率特性，参数记录于频率特性测量记录表中，可以画出放大电路的频率特性图。

频率特性测量记录表									
$f/\text{KHz}$	$f_1=\quad$	$f_2=\quad$	$f_L=\quad$	$f_3=\quad$	$f_M=\quad$	$f_4=\quad$	$f_H=\quad$	$f_5=\quad$	$f_6=\quad$
$U_o/\text{V}$									
<b>Au</b>									

放大电路的频率特性图：

4) 其他可以做的测量……

(3) 实验内容三的电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 12 单元的作业中。

## 四、 实验要求

1. 根据实验内容、技术指标及实验室现有条件，设计出原理图，分析工作原理，计算元件参数。
2. 利用 Multisim 软件进行仿真，优化设计。
3. 实际搭试所设计电路，使之达到设计要求。
4. 按照设计要求对调试好的硬件电路进行测试，记录测试数据，分析电路性能指标。
5. 撰写实验报告。

## 五、 预习思考

### 1. 器件资料:

上网查询本实验所用的三极管 9013 的数据手册，画出三极管封装示意图，标出每个管脚的名称，将相关参数值填入下表：

参数符号	参数值	参数意义及设计时应该如何考虑
$V_{CB0}$		
$V_{CEO}$		
$V_{EBO}$		
$I_C$		
$I_E$		
$h_{FE}$		
$V_{CE(sat)}$		
$V_{BE}$		
$f_T$		

## 六、 设计指导

### 1. 电压增益（电压放大倍数 $A_u$ ）测量方法

电压增益是电路的输出电压和输入电压的比值，包括直流电压增益和交流电压增益。

实验中一般采用万用表的直流档测量直流电压增益，测量时要注意表笔的正负。

交流电压增益测量要在输出波形不失真的条件下，用交流毫伏表或示波器测量输入电压  $U_i$ （有效值）或  $U_{im}$ （峰值）或  $U_{ipp}$ （峰-峰值）与输出电压  $U_o$ （有效值）或  $U_{om}$ （峰值）或  $U_{opp}$ （峰-峰值），再通过计算可得。测试框图如图 2.4 所示，其中示波器起到了监视输出波形是否失真的作用。

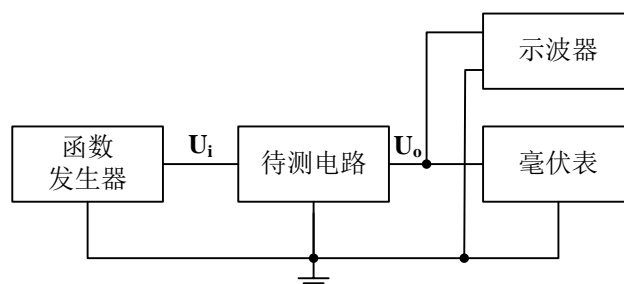


图 2.4 电压增益（电压放大倍数  $A_u$ ）测量

### 2. 用示波器测量电压传输特性曲线的方法

双端口网络的输出电压值随输入电压值的变化而变化的特性叫做电压传输特性。电压传输特性在实验中一般采用两种方法进行测量。一种是手工逐点测量法，另一种是采用示波器 X-Y 方式进行直接观察。

手工逐点测量法：可以在输入端加一个输入信号，逐步改变输入端电压，每改变一次记录一个输出电压值，最后把所有测量所得数据记录在坐标纸上，所有的点连接起来就是电压传输特性曲线。这种测量方式最大的优点是设备简单，只要有信号源和电压表就可以了，缺点是繁琐，同时由于是取有限的点进行测量，有可能丢失比较重要的信息点，所以测量精度有限。

示波器 X-Y 方式直接观察法：是把一个电压随时间变化的信号（如：正弦波、三角波、锯齿波）在加到电路输入端的同时加到示波器的 X 通道，电路的输出信号加到示波器的 Y 通道，利用示波器 X-Y 图示仪的功能，在屏幕上显示完整的电压传输特性曲线，同时还可以测量相关参数。测量方法如图 2.5 所示。

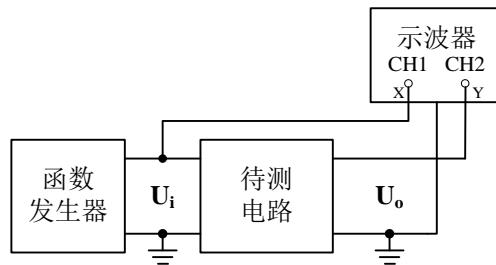
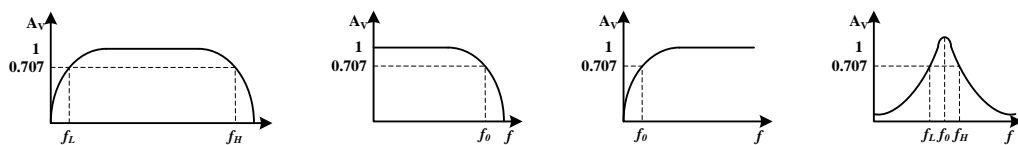


图 2.5 电压传输特性曲线测量

具体测量步骤如下：

- (6) 选择合理的输入信号电压，一般与电路实际的输入动态范围相同，太大除了会影响测量结果以外还可能会损坏器件；太小不能完全反应电路的传输特性。
  - (7) 选择合理的输入信号频率，频率太高会引起电路的各种高频效应，太低则使显示的波形闪烁，都会影响观察和读数。一般取 50~500Hz 即可。
  - (8) 选择示波器输入耦合方式，一般要将输入耦合方式设定为 DC，比较容易忽视的是在 X-Y 方式下，X 通道的耦合方式是通过触发耦合按钮来设定的，同样也要设成 DC。
  - (9) 选择示波器显示方式，示波器设成 X-Y 方式，对于模拟示波器，将扫描速率旋钮逆时针旋到底就是 X-Y 方式；对于数字示波器，按下“Display”按钮，在菜单项中选择 X-Y。
  - (10) 进行原点校准，对于模拟示波器，可把两个通道都接地，此时应该能看到一个光点，调节相应位移旋钮，使光点处于坐标原点；对于数字示波器，先将 CH1 通道接地，此时显示一条竖线，调节相应位移旋钮，将其调到和 Y 轴重合，然后将 CH1 改成直流耦合，CH2 接地，此时显示一条水平线，调节相应位移旋钮，将其调到和 X 轴重合。
3. 幅频特性曲线、上限频率、下限频率、截止频率中心频率、带宽的测量方法：



(a)单级放大器放大特性      (b)低通特性      (c)高通特性      (d)带通特性

图 2.6 幅频特性示意图

幅频特性反应了电路增益和频率之间的关系，图 2.6 列出了常见的幅频特性类型。(a)和(d)中的  $f_L$  表示下限频率， $f_H$  表示上限频率，带宽  $BW=f_H-f_L$ ，(d)中的  $f_0$  表示中心频率；(b)和(c)中的  $f_0$  表示截止频率。在实验中可采用“逐点法”测量不同频率时的电压放大倍数  $A_u$  来测量幅频特性。测量时，保持输入信号幅度不变，改变输入信号频率，每改变一次信号频率，用交流毫伏表或示波器测量一个输出电压值，计算其增益，然后将测试数据列表、整理并在坐标纸上将其连接成曲线。由于函数发生器的输出信号幅度在不同频率时可能会有变化，因此每改变一次频率都要用交流毫伏表或示波器测量输入信号的幅度，一定要保证输入信号的幅度不改变。

为了更快更准确的测量幅频特性，必须根据不同幅频特性类型，选择不同的测量技巧。对于(a)可先测出中频区的输出电压值，然后调高或调低频率使输出电压降到中频电压值的 0.707 倍，从而找到  $f_L$  和  $f_H$ ，然后在  $f_L$  和  $f_H$  之间和左右找 3 至 5 个点进行测量，即可较准确的绘制曲线。(b)和(c)也可参考这种方式来测量。对于(d)可从较低的频率值逐步增加频率，用交流毫伏表或示波器测量输出信号，刚开始输出信号幅度随着频率的增加而增加，当增加到某一个频率时，输出信号幅度随着频率的增加开始减小，则该频率为中心频率，记下该频率对应的幅度，然后调高或调低频率使输出电压降到中心频率电压的 0.707 倍，从而找到  $f_L$  和  $f_H$ 。

注：也可以使用扫频仪来测量放大器的频率特性，连接方式见图 2.7 所示。

扫频信号加至被测电路，检波探头对被测电路的输出信号进行峰值检波，并将检波所得信号送往示波器 Y 轴电路，该信号的幅度变化正好反映了被测电路的幅频特性，因而在屏幕上能直接观察到被测电路的幅频特性曲线。



图 2.7 利用扫频仪测量放大电路频率特性

#### 4. 三极管放大电路设计提示

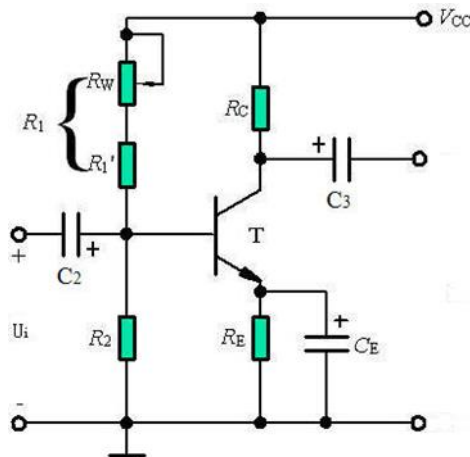


图 2.8 射级偏置电路

- (1) 对于图 2.8 中的偏置电路，只有  $R_2$  支路中的电流  $I_1 \gg I_{BQ}$  时，才能保证  $U_{BQ}$  恒定实现自动稳定工作点的作用，所以工程中一般取： $I_1 = (5 \sim 10)I_{BQ}$ （硅管）

$$I_1 = (10 \sim 20)I_{BQ} \quad (\text{锗管})。$$

- (2) 为了提高电路的稳定性，一般要求  $U_{BQ} \gg U_{BE}$ ，工程中一般取  $U_{BQ} = (5 \sim 10)U_{BE}$ ，即  $U_{BQ} = (3 \sim 5)V$ （硅管）， $U_{BQ} = (1 \sim 3)V$ （锗管）。

- (3) 电路的静态工作点电流  $I_{CQ} \approx \frac{U_{BQ} - U_{BE}}{R_E}$ ，由于是小信号放大，所以  $I_{CQ}$  一般取

0.5~2mA。

- (4)  $I_{CQ}$  确定后通过以下公式可计算  $R_1$  和  $R_2$  的值：

$$R_2 = \frac{U_{BQ}}{I_1} = \frac{U_{BQ}}{(5 \sim 10)I_{BQ}} = \frac{\beta \cdot U_{BQ}}{(5 \sim 10)I_{CQ}}, \quad R_1 = \frac{V_{CC} - U_{BQ}}{I_1} = \frac{(V_{CC} - U_{BQ})R_2}{U_{BQ}}。$$

$$(5) \text{ 交流电压放大倍数 } Au = -\frac{\beta \cdot R'_L}{r_{be}} = -\frac{\beta \cdot R'_L}{r_b + (1 + \beta)r_e} = -\frac{\beta \cdot R'_L}{300 + (1 + \beta)\frac{26mV}{I_{CQ}}}。$$

$$(6) \text{ 交流输入阻抗 } R_i = r_{be} // R_1 // R_2 \approx r_{be} = r_b + (1 + \beta)r_e = 300 + (1 + \beta)\frac{26mV}{I_{CQ}}。$$

$$(7) \text{ 交流输出阻抗 } R_o = r_o // R_C \approx R_C。$$

(8) 电路频率特性的下限频率值主要受  $C_2$ ,  $C_3$  和  $C_E$  影响, 其关系分别为:

$$f_L \geq (3 \sim 10) \frac{1}{2\pi \cdot (R_S + r_{be}) \cdot C_2}, \quad f_L \geq (3 \sim 10) \frac{1}{2\pi \cdot (R_C + R_L) \cdot C_3},$$

$$f_L \geq (1 \sim 3) \frac{1}{2\pi \cdot (R_E // \frac{R_S + r_{be}}{1 + \beta}) \cdot C_E}。$$

5. 共集电极放大电路设计提示

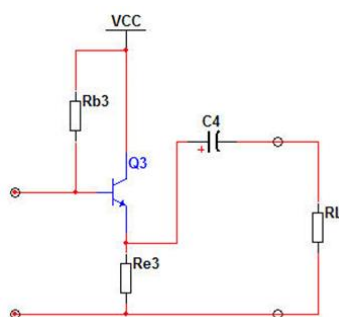


图 2.9 共集电极放大器

(1) 静态工作点

$$I_{EQ} = (1 + \beta)I_{BQ} = (1 + \beta) \cdot \frac{V_{CC} - U_{BEQ}}{R_{b3} + (1 + \beta)R_{e3}}$$

$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{EQ}R_{e3}$$

(2) 电压放大倍数

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(1 + \beta)R_{e3} // R_L}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e3} // R_L}$$

可见, 当  $(1+\beta)R_{e3} // R_L \gg r_{be}$  时,  $A_u \approx 1$ , 故常称为射极跟随器。

(3) 输入电阻  $R_i = R_{b3} // [r_{be} + (1+\beta)R_{e3} // R_L]$

(4) 输出电阻  $R_o = \frac{R_{b3} + r_{be}}{1+\beta} // R_{e3}$

## 6. 多级放大器设计提示

在许多应用场合, 要求放大器有较高的放大倍数及合适的输入、输出电阻, 而单级放大器的性能不一定满足要求, 需要将多个基本放大器级联起来, 构成多级放大器。由于每种基本组态放大器的性能不同, 故在构成多级放大电路时, 应充分利用它们的特点, 合理组合, 用尽可能少的级数来满足放大倍数、输入、输出电阻和频带宽度等的要求。

### (1) 级间耦合方式

多级放大器各级之间连接的方式称为耦合方式, 常用耦合方式有三种, 即阻容耦合、变压器耦合和直接耦合。级间耦合时, 一方面要确保各级放大器有合适的直流工作点, 另一方面应使前级输出信号尽可能不衰减地加到后级输入。因此在设计电路时要选择合适的级间耦合方式。

### (2) 级联放大器的性能指标计算

一个  $n$  级放大器的总电压放大倍数  $A_u$  可表示为:

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_{o1}}{u_i} \cdot \frac{u_{o2}}{u_{o1}} \cdots \frac{u_o}{u_{o(n-1)}} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdots A_{un}$$

多级放大器输入电阻即第一级放大器的输入电阻, 前提是将第二级放大器的输入电阻当做第一级放大器的负载电阻, 即

$$R_i = R_{i1} \Big|_{R_{L1}=R_{i2}}$$

多级放大器输出电阻即最末级放大器的输出电阻, 前提是将前一级放大器的输出电阻当做最末级放大器的信号源内阻, 即

$$R_o = R_{on} \Big|_{r_{sn}=R_{o(n-1)}}$$

## 7. 负反馈对放大器性能的影响设计提示

引入交流负反馈后, 放大器的放大倍数将下降, 其表达式为  $A_F = \frac{A}{1+AF}$ 。式中,  $F$  为反馈网络的反馈系数;  $A$  为无负反馈时的放大倍数。引入负反馈后通频带加宽, 负反馈放大器的上限频率  $f_{HF}$  与下限频率  $f_{LF}$  的表达式分别为  $f_{HF} = (1+AF)f_H$  和  $f_{LF} = \frac{f_L}{1+AF}$ 。引入负反馈还会改变放大器的输入电阻与输出电阻, 其中并联负反馈能降低输入阻抗, 串联负反馈能提高输入阻抗, 电压负反馈使输出阻抗降低, 电流负反馈使输出阻抗升高。



## 七、应用拓展

### 1. 三极管的分类

三极管按材质分：硅管、锗管；按结构分：NPN、PNP；按功能分：开关管、功率管、达林顿管、光敏管等；按功率分：小功率管、中功率管、大功率管；按工作频率分：低频管、高频管、超频管；按结构工艺分：合金管、平面管；按安装方式：插件三极管、贴片三极管。

不同的三极管有着各自的应用场合，选择合适的三极管至关重要。

## 八、考核要求

4. 预习、预搭；
5. 在线实验测试成绩、参与在线讨论质量；
6. 实验报告（要求见教学计划）。把上传到 MOOC 实验网上的三份报告整合成一个文档提交给带课老师。

## 九、注意事项

1. 各仪器的地线应与电路的地相连接。
2. 稳压电源的输出电压应预先调到所需的电压值再接入实验电路中。
3. 若电路存在自激，可改变元件的接线位置或走向，并注意电解电容的极性。
4. 在测幅频特性时，随着频率升高，信号发生器的输出幅度可能会下降，从而出现输入信号  $U_i$  与输出信号  $U_o$  同时下降的现象。所以在实验中要经常测量输入电压值，使其维持 5mV 不变。

