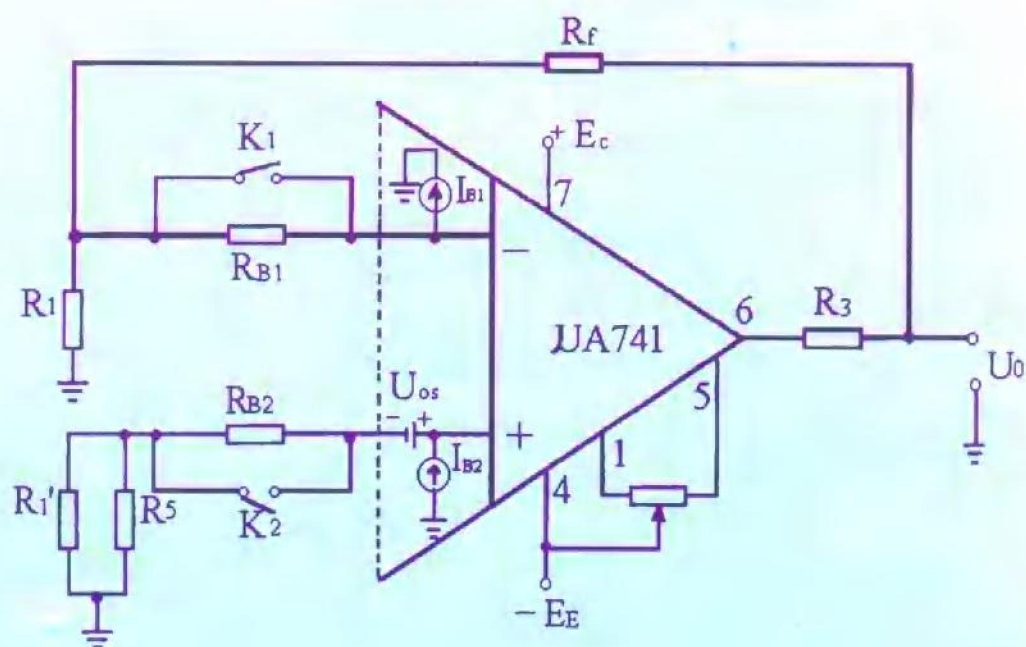


# 模拟电路实验

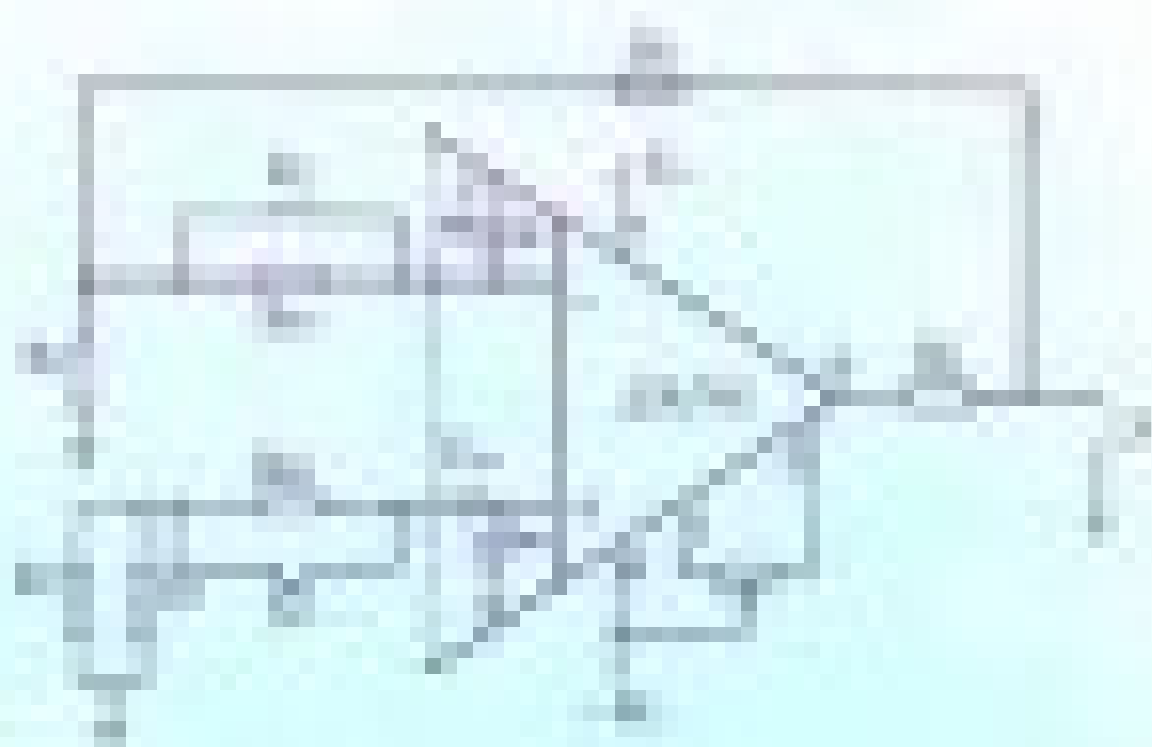
康凤兴/编著



中央民族大学出版社

# 模拟电路实验

实验一 二极管电路



实验二 三极管放大电路

高等学校实验教学参考用书

# 模拟电路实验

康凤兴 编著

中央民族大学出版社

责任编辑 俞 琛

封面设计 赵秀琴

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电路实验/康凤兴编著. - 北京:中央民族大学出版社, 1999.12

ISBN 7-81056-282-7

I.模… II.康… III.模拟电路-实验-教材 IV.TN710-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 77202 号

## 模 拟 电 路 实 验

---

出 版 者: 中央民族大学出版社

中国北京市海淀区白石桥路 27 号 邮编:100081

国际互联网网址: <http://cumlp.com.cn>

电子邮件(E-mail): [nckpm@public.bta.net.cn](mailto:nckpm@public.bta.net.cn)

电话:68472815 68932751 传真:68932447

印 刷 者: 中央民族大学印刷厂

发 行 者: 新华书店

开 本: 850×1168(毫米) 1/16 印张:11.5 字数:220 千字

版 次: 1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-81056-282-7/TN·1

定 价: 16.00 元

---

版权所有 翻印必究

## 内容提要

本书为模拟电路实验教材。其中实验项目分为验证测量型、简单设计型和综合应用型三个层次。实验内容由分立器件到集成电路、由各种放大器特性测量到集成运放应用的综合设计，这种由易到难、由单项到综合的训练，对提高学生的动手能力和素质的培养是大有益的。

本教材有 16 个实验，其中 10 个为基本实验，6 个为设计和综合应用实验。每个基本实验为 2—3 个学时，每个设计和综合应用实验为 4—6 个学时。不同学科专业根据实际情况，可选作不同项目、不同内容的实验。

本教材可供高等理工院校电子类、非电子类专业师生使用和参考。

## 前 言

本教材是配合我校电子技术基础教学而编写的实验教材。在编写过程中，结合多年教学经验和我校民族地区学生的特点，为适应改革开放形势的需要，在原来实验讲义的基础上，增加了一些综合性和设计性的实验。这对培养学生的动手能力和创新开发能力是大有益的。

本教材在原实验讲义的基础上增加了有源滤波器的研究、PID 调节器的研究、电压比较器的研究、多种波形发生器的研究和集成稳压电源的设计等内容。

全书共分三部分，包括 16 个模拟电路实验、测量仪器的使用、元器件介绍和数据误差处理等内容。

本书在编写过程中得到了本教研室廖芳和其它老师的支持，李庆宝、杨蔚宇等同志参加了电脑绘图、排版、打印等工作。本书印刷出版过程中，得到了李茂林、钮金真等老师的支持，在此表示衷心的感谢。

由于本人的水平有限、编写时间仓促，缺点、遗漏和错误在所难免，希望读者和同仁批评、指正。

编 者

1999 年 12 月于中央民族大学

# 目 录

|      |                       |    |
|------|-----------------------|----|
| 第一章  | 实验项目 .....            | 1  |
| 实验一  | 部分元器件的特性参数及测量方法 ..... | 2  |
| 实验二  | 单级放大器 .....           | 3  |
| 实验三  | 射极输出器 .....           | 7  |
| 实验四  | 差动放大器 .....           | 12 |
| 实验五  | 集成运算放大器参数的测量 .....    | 16 |
| 实验六  | 集成运算放大器的应用 .....      | 25 |
| 实验七  | 负反馈放大器 .....          | 32 |
| 实验八  | 多种波形发生器的研究 .....      | 39 |
| 实验九  | 电压比较器的研究 .....        | 42 |
| 实验十  | 有源滤波器的研究 .....        | 46 |
| 实验十一 | 调谐放大器与 LC 振荡器 .....   | 53 |
| 实验十二 | OTL 功率放大器 .....       | 58 |
| 实验十三 | 集成功率放大器的焊接与调试 .....   | 61 |
| 实验十四 | PID 调节器的研究 .....      | 64 |
| 实验十五 | 整流、滤波与稳压电源 .....      | 71 |
| 实验十六 | 集成稳压电源 .....          | 78 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| <b>第二章 常用电路测试仪器 .....</b>      | <b>83</b>  |
| 一、MF64 型万用电表 .....             | 83         |
| 二、DT890D 型数字万用表 .....          | 88         |
| 三、AS2294A 型双通道交流电压表 .....      | 94         |
| 四、BJ-4814 型半导体管特性图示仪 .....     | 98         |
| 五、E1641B 型函数信号发生器/计数器 .....    | 108        |
| 六、XFG-7 型高频信号发生器 .....         | 115        |
| 七、DF1731SL/2A 型可调式直流稳压电源 ..... | 122        |
| 八、BS-601 型双踪示波器 .....          | 127        |
| 九、SZ-3 型失真度测量仪 .....           | 133        |
| <b>第三章 附录 .....</b>            | <b>143</b> |
| 附录一 各种元器件的介绍 .....             | 143        |
| 附录二 测量误差和测量数据的处理 .....         | 170        |

# 第一章 实验项目

模拟电子电路实验的特点和方法。

## 1. 特点

模拟电子电路实验所使用的器件大多数是非线性的，因此在实验时就要合理的选择和调整工作点以及使工作点能保持稳定。而工作点是由偏置电路来确定的，因此偏置电路的设计和调整在模拟电路实验中是非常重要的。另外由于温度的变化、电源电压的波动、输入信号幅度的变化，都会影响非线性器件工作状态的变化，因此保持器件工作点的稳定对实验中获得精确数据和实验的顺利进行是非常重要的。

由于器件的特性参数分散性大，元件（如电阻器、电容器和电感器等）的元件值有一定的误差，使得实际电路与设计的参数指标有一定的差异，实验时对电路必须进行调试。对于已调好的电路，若更换了某个元器件，也要重新进行调试。因此通过实验，掌握调试方法，积累调试经验也是很重要的。

模拟电子电路的输入与输出之间的关系具有一定的依赖性、连续性、多样性和复杂性。对于不同的模拟电路实验要采用不同的测试手段和测试设备，因此要求实验者必须熟悉这些仪器设备的性能和使用方法。另外，由于测试仪器的非理想特性（如信号源的内阻，示波器和电压表的输入阻抗不很高等），测试时测试仪器对被测电路的工作状态会有一定的影响，将影响实验结果的精确度。因此实验时选择合适的测试仪器和测量量程，是应该重视的问题。

电路中的分布电容、寄生电感及外界的电磁干扰，对电路的特性或某些参数可能造成不同程度的影响，严重时甚至会产生自激，使实验不能顺利进行。因此除了注意元器件的合理布局、接地点的合理选择以及良好的接地、屏蔽外，实验时还要注意各种连接线和测试线的合理安排及连接方法。

## 2. 方法

掌握实验课的学习规律是很重要的。实验课是以学生动手做为主要内容，为了作好实验，对每个实验都要进行预习、实验和总结三个阶段，每个阶段的任务与要求如下：

1) 预习：要求弄清本实验的目的、原理、内容、要求、方法、仪器的使用以及实验中应注意的问题。拟订出实验步骤、画出记录表格、提出所用的特殊元器件。还要对实验结果作出估计，以便实验时可以及时的检验实验结果的正确性。预习作的是否充分，将直接影响实验能否顺利的进行和完成。

2) 实验：是学生按照实验步骤直接动手操作的过程，实验中可能出现各种预习时预想不到的问题，结合理论，通过认真分析，采取相应措施加以解决，使实验按时顺利完成。要作好原始数据的记录。通过实验提高动手能力，解决

实际问题的能力以及培养实事求是的严谨的科学作风。

3) 总结：整理实验数据，根据要求画出曲线，分析实验结果和存在的问题，写出实验报告。这对培养学生总结、归纳、分析问题和写作能力是大有益的。

## 实验一 部分元器件的特性参数及测量方法

### 一、实验目的

1. 了解部分元器件的特性参数和使用方法。
2. 学会使用 BJ4814 型半导体管特性图示仪观测二极管、三极管和其他器件特性曲线及参数的方法。
3. 熟悉常用仪器的使用方法。

### 二、实验原理

对于抹掉型号的半导体三极管,利用 PN 结单向导电的特性,通过万用表测量 PN 结正反向电阻值的大小,可判断三极管的基极。方法是：用第一支表笔碰触某个电极，用另一支表笔依次碰触另外两个电极时测量的电阻值都很小，那么第一支表笔接的是基极。若两次测量的电阻值是一大一小，相差很大，则第一支表笔接的不是基极，应更换其它电极重测。

判断三极管是 PNP 型或 NPN 型。方法是：若正表笔接基极，而当负表笔依次碰触另外两个电极时，测量的电阻值都较小，此管为 PNP 型。若两次测量的阻值都比较大，则为 NPN 型。

由于发射区比集电区的掺杂浓度高，E、C 极间的正向电流大、电阻小的特点，判断三极管发射极 E 和集电极 C。

### 三、实验仪器和器材

1. MF-64 型万用表
2. DT890D 型数字万用表
3. BJ4814 型半导体管特性图示仪
4. 色环电阻、电容器若干，不同型号的三极管若干

### 四、实验内容和方法

1. 介绍电阻器、电容器和部分器件的特性、参数及使用方法（参看附录一）。要求学生读色环电阻器的阻值、误差和电容器的电容值、误差。
2. 会用万用表判断三极管的各个电极、型号（NPN 型还是 PNP 型）及锗管还是硅管。

3. 用 BJ4814 型半导体管特性图示仪, 观察测量二极管、三极管和其他器件的特性曲线及参数 (参看第二章中“四”的有关内容)。

4. 熟悉函数信号发生器、双通道交流电压表、双踪示波器和直流稳压电源的使用方法 (参看第二章中的有关内容)。

## 五、实验报告

1. 举例说明色环电阻器和电容器的读数方法。
2. 说明万用表判断三极管各个电极的原理和操作方法。
3. 画出图示仪所观测三极管的输入、输出特性曲线。

## 实验二 单级放大器

### 一、实验目的

1. 掌握调整和测量放大器工作点的方法。
2. 掌握测量放大器的电压放大倍数、频率响应曲线和动态范围的方法。
3. 了解放大器参数对放大性能的影响。
4. 熟悉示波器、交流电压表、信号发生器和直流稳压电源的使用方法。

### 二、实验原理

单级放大器是由一个放大器件 (如三极管或场效应管) 所构成的简单放大电路, 它是组成各种复杂放大电路的基本单元。本实验是以共发射极放大器为例, 说明它的工作原理, 工作点的建立和各项参数的测量。

在图 1 所示的共发射极放大电路中, 用的是硅材料 NPN 型三极管;  $E_c$  是集电极回路的电源,  $R_c$  是集电极负载电阻,  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  是用以设置和稳定工作点的, 基极电位由  $R_{b1}$  与  $R_{b2}$  的分压形成的;  $R_e$  为发射极回路的电阻, 起直流电流负反馈的作用,  $C_e$  为旁路电容;  $C_1$  和  $C_2$  起隔直耦合交流信号的作用。

当放大电路没有输入信号 ( $U_i=0$ ) 时, 电路中各点的电压、电流都是不变的直流, 称为直流工作状态 (简称静态)。在静态工作情况下, 三极管各电极的直流电压和直流电流的数值, 将在管子的特性曲线上确定一点, 这点称为管子的静态工作点。当放大电路输入信号后, 电路中各点的电压、电流便处于变动状态, 这时电路处于动态工作情况, 称为动态。

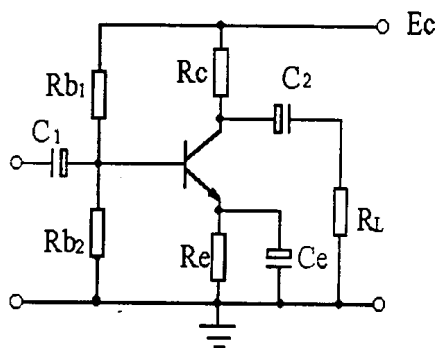


图 1 共发射极放大电路

放大器的基本任务是在不失真的条件下，对输入进行放大，放大器的性能与其静态工作点的位置有直接关系。而静态工作点则是由三极管的参数和放大器的偏置电路共同决定的，通过调整使三极管工作在合适的工作点上。

用直流电流表和电压表分别测量三极管的集电极电流  $I_c$  和各极的直流电压  $U_b$ 、 $U_c$  和  $U_e$ 。为了测量方便，可采用电压测量法来换算出工作电流，例如只要测出  $U_e$ ，可由  $I_c = I_e = U_e / R_e$ ，算出集电极电流  $I_c$ 。如果三极管的工作点调得偏高，当信号电压正半周的某部分进入三极管的饱和区时，则使输出电压波形的底部被切掉，产生了饱和失真。如果三极管的工作点调得偏低，当信号电压负半周的某部分进入三极管的截止区时，则使输出电压波形的顶部被切掉，产生截止失真。以上两种失真均可通过重新调整三极管的静态工作点进行消除。若将三极管的静态工作点调在交流负载线的中点，可获得放大器的最大动态范围。

### 三、实验仪器和设备

1. BS-601 型双踪示波器
2. AS2294A 型双通道交流电压表
3. EE1641B 型函数信号发生器
4. DF1731SL/2A 型可调式直流稳压电源
5. MF-64 型万用电表
6. DT890D 型数字万用表
7. 实验电路板

### 四、实验内容和方法

实验电路板如图 2 所示。

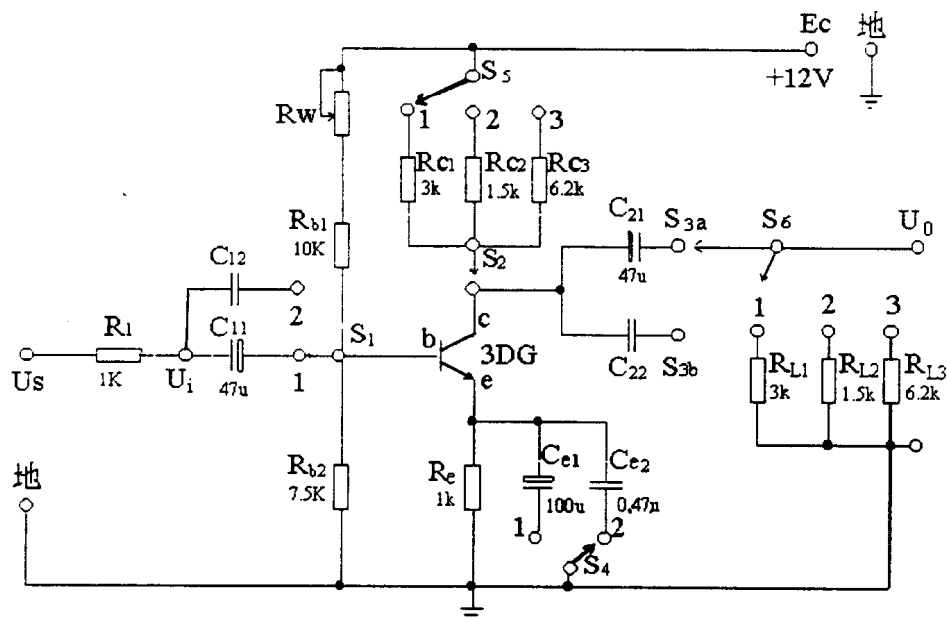


图 2

### 1. 静态工作点的调整和测量

将直流电流表(mA 档)串接于  $S_2$  与集电极之间, 开关  $S_4$  接插座 1,  $S_3$  接插座 1。调节电位器  $R_w$ , 建立放大器的静态工作点, 使  $I_c=1.5\text{mA}$  左右。调整完毕取下电流表, 用插头线接通电路。用万用表分别测量  $U_{be}$ 、 $U_{ce}$ , 发射极 e、基极 b 和集电极 C 对地的电位  $U_e$ 、 $U_b$  和  $U_c$ , 则  $U_{be}=U_b-U_e$ ,  $U_{ce}=U_c-U_e$  (如果万用表内阻很高, 可直接测量 b、e 间的电压  $U_{be}$  和  $U_{ce}$ )。将上述测量结果记录于表 1。

表 1 放大器的静态工作点

| 被测量     | $I_c$ | $U_e$ | $U_b$ | $U_c$ | $U_{be}$ | $U_{ce}$ |
|---------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| 测量值 (V) |       |       |       |       |          |          |

### 2. 测量放大倍数 $A_u$

按图 3 接好电路, 将函数信号发生器和交流电压表接在放大器的输入端, BS-601 型双踪示波器接在放大器的输出端。调节信号发生器上的有关旋钮, 使  $f=1\text{kHz}$ ,  $U_i$  从“0”开始逐渐增加, 同时观察示波器上的波形是否出现失真, 直到  $U_i=10\text{mv}$  波形不失真为止。

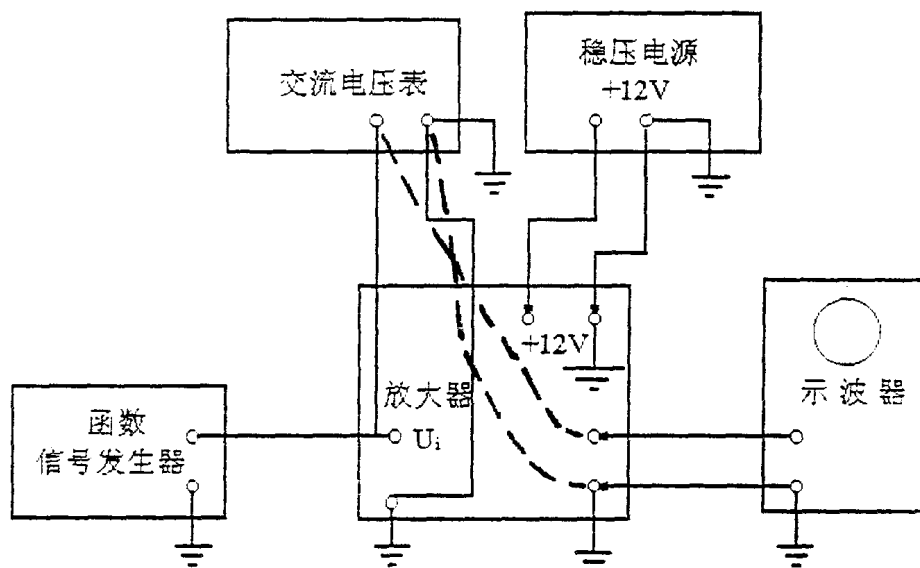


图 3 仪器接线图

用交流电压表测量放大器的输出电压  $U_o$ , 记录于表 2 中。

表 2  $f=1\text{kHz}$

|                   |  |
|-------------------|--|
| $U_i$ (mv)        |  |
| $U_o$ (v)         |  |
| $ A_u  = U_o/U_i$ |  |

### 3. 测量动态范围

保持信号发生器的频率为  $f=1\text{KHz}$ ，使其电压  $U_i$  由 0 逐渐增加，并观察示波器上的输出波形，是否正、负半周同时出现最大不失真的波形。如果波形的正、负半周不是同时出现失真，说明放大器的工作点不在交流负载线中点附近，应重新调节电位器  $R_w$ ，改变工作点的位置，直到输出波形在正、负半周同时出现最大不失真波形为止。用电压表测量此时放大器的输出电压  $U_o$ ，即可求出放大器的动态范围。

$$2U_{om} = 2\sqrt{2}U_o$$

保持其它条件不变，将开关  $S_6$  分别接在插座 1、2、3 上，改变外接负载  $R_L$  的大小，重复上述步骤，将测量结果记录于表 3 中。

表 3  $f=1\text{KHz}$

| $R_L$ ( $\text{K}\Omega$ ) | 3.0 $\text{K}\Omega$ | 1.5 $\text{K}\Omega$ | 6.2 $\text{K}\Omega$ |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $U_o$ (V)                  |                      |                      |                      |
| $2U_{om} = 2\sqrt{2}U_o$   |                      |                      |                      |

#### 4. 集电极负载电阻 $R_c$ 对放大倍数 $A_u$ 的影响

保持  $f=1\text{KHz}$ ,  $U_i=10\text{mv}$ ，改变  $R_c$  的大小，即将  $S_5$  分别接在插座 1、2、3 上(每改变一次  $R_c$  值，就要重新调节  $R_w$ ，使  $I_c$  保持为 1.5mA)，测量不同  $R_c$  时的放大倍数  $A_u$ ，同时观察输出波形有无失真现象，将测量的  $U_o$  值记录于表 4 中。

#### 5. 观察静态工作点选择不合理所引起的波形失真

保持  $f=1\text{KHz}$ ， $U_i=10\text{mv}$ ， $S_5$  接在插座 1 上( $R_c=3\text{K}\Omega$ )

1) 将电位器  $R_w$  的阻值增至最大(顺时针方向旋到头)，观察示波器上的输出波形是否出现截止失真，描下此时的波形。若波形不失真，可适当加大  $U_i$ 。

表 4  $f=1\text{KHz}$   $U_i=10\text{mV}$

| $R_c$ ( $\text{K}\Omega$ ) | 3 $\text{K}\Omega$ | 1.5 $\text{K}\Omega$ | 6.2 $\text{K}\Omega$ |
|----------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| $U_o$ (V)                  |                    |                      |                      |
| $ A_u =U_o/U_i$            |                    |                      |                      |
| 输出波形的变化                    |                    |                      |                      |

2) 将电位器  $R_w$  的阻值减至最小(逆时针方向旋到头)，观察示波器上的输出波形是否出现饱和失真，描下此时的波形，记录于表 5 中。

表 5  $f=1\text{KHz}$

| 工作点 | $I_c$ 的变化 | $U_o$ 的波形 |
|-----|-----------|-----------|
| 截止区 |           |           |
| 饱和区 |           |           |

#### 6. 测量频率的响应曲线( $A_u \sim f$ 曲线)

保持  $U_i=10\text{mv}$  不变，改变其频率，测量  $U_o$  的变化， $f$  从 20Hz 变化到  $10^6\text{Hz}$ ，

在测量过程中应注意：

- 1) 在各个测量点都应保持  $U_i=10\text{mV}$ 。
- 2) 测量点的位置，在低频段和高频段区域放大倍数  $A_u$  变化大，应多测几个点；在中频段  $A_u$  变化小，可少测几个点，测量值记录于表 6 中。

表 6  $U_i=10\text{mV}$

| f (Hz)    | 100 | 300 | 700 | 1K | 100K | 300K | 500K | 700k | 1M |
|-----------|-----|-----|-----|----|------|------|------|------|----|
| $U_o$ (V) |     |     |     |    |      |      |      |      |    |
| $A_u$     |     |     |     |    |      |      |      |      |    |

## 五、实验报告

1. 画出单级放大器的实验电路图，并标明元件值和静态工作点的电流、电压值。
2. 整理和计算测量数据，列成表格并画出波形。
3. 画出频率响应曲线(即  $A_u-f$  曲线)，在单对数坐标纸上，以  $\lg f$  为横轴， $A_u$  为纵轴作频响曲线并由此曲线求出高半功率点  $f_H$  和低半功率点  $f_L$ 。
4. 根据实验结果，分析负载和工作点的变化对输出波形的影响。
5. 根据实验结果，分析外接负载  $R_L$  对放大器动态范围的影响。

## 实验三 射极输出器

### 一、实验目的

1. 通过与阻容耦合放大器的比较，进一步掌握射极输出器的特点。
2. 学会测量放大器的输入与输出电阻的方法。
3. 了解“自举”电路在提高射极输出器输入电阻中的作用。

### 二、实验原理

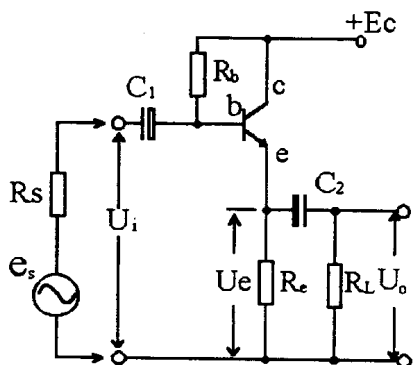


图 1 射极输出器

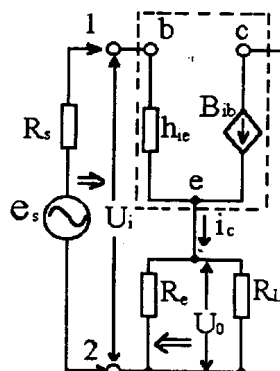


图 2 射极输出器的等效电路

射极输出器是一种反馈很深的电压串联负反馈放大器，它的基本电路如图 1 所示。

1. 射极输出器主要特点有

1) 输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_i$  同相。

2) 输入电阻  $R_{if}$  高。射极输出器的等效电路如图 2 所示，它的输入电阻就是从 1、2 两端向三极管看进去的等效电阻，即：

$$R_{if} = \frac{U_i}{I_i} \quad R_i = \beta \frac{R_e R_L}{R_e + R_L}$$

3) 输出电阻低

射极输出器的输出电阻可以看成当输入端加入信号  $e_s$  后，从输出 3、4 两端向三极管看进去的一个等效电源的等效内阻  $R_o$ ，如图 3 所示。

输出电阻：

$$R_o = \left( \frac{U_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L$$

4) 电压放大倍数  $A_{uf} \approx 1$ ，而电流放大倍数及功率放大倍数均大于 1。

5) 具有良好的跟随特性。

由于射极输出器具有输入电压与输出电压同相位、其电压放大倍数  $A_{uf} \approx 1$  的特点，使其输出电压的幅度和相位能跟随着输入电压而变化，因此具有良好的跟随特性。

6) 具有较好的频率特性。

2. 利用“自举”电路可使阻值较小的基极直流偏置电阻对信号源呈现相当大的交流输入电阻。图 4 为具有“自举”电路的射极输出器，图 5 为它的等效电路。

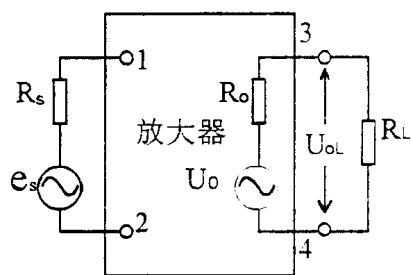


图 3 放大器的输出电阻

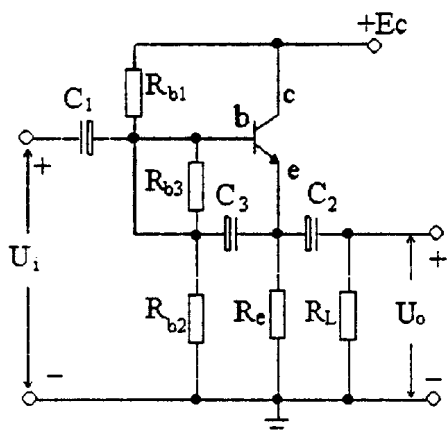


图 4 具有“自举”电路的射极输出器

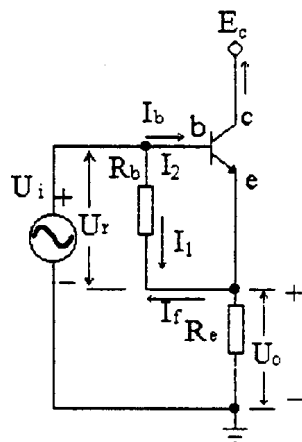


图 5 等效电路

由于射极输出器输入与输出电压的同相作用。 $U_i$  升高、 $U_o$  也升高。通过  $R_{b3}$  使  $U_b$  也相应抬高，即用输出电压的上升去“举高”自己的基极电压，故称为“自举电路”。

等效输入电阻为

$$R_{bf} = \frac{U_i}{U_r} = \frac{R_{b3}}{1 - A_{uf}}$$

$\because 1 - A_{uf} < 1 \quad \therefore R_{bf} \gg R_{b3}$  说明输入电阻大大提高。

### 三、实验仪器和设备

1. BS-601 型双踪示波器
2. AS2294A 型双通道交流电压表
3. EE1641B 型函数信号发生器
4. DF1731SL/2A 型可调式直流稳压电源
5. MF-64 型万用表
6. DT890D 型数字万用表
7. 实验电路板

### 四、实验内容和方法

实验电路板如图 6 所示。

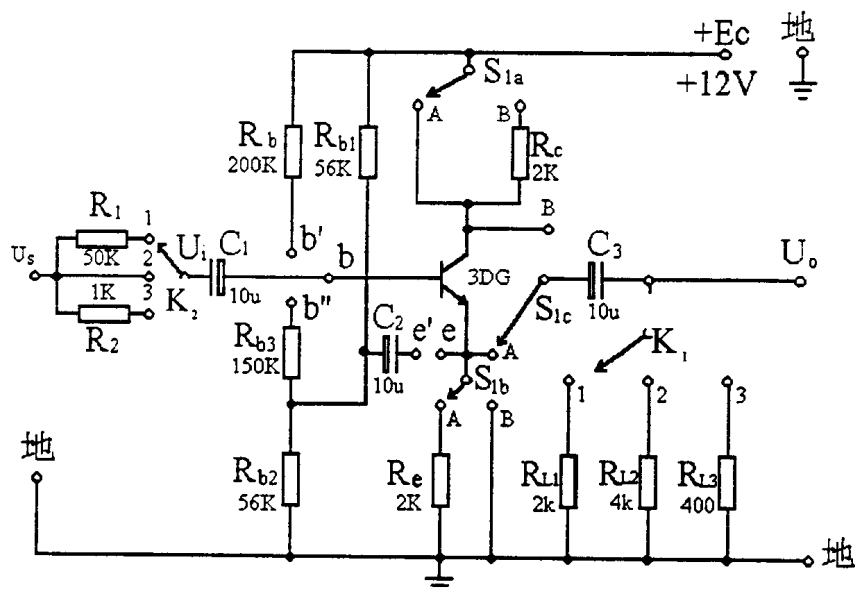


图 6 射极输出器实验电路板

当  $S_{1a}$ 、 $S_{1b}$ 、 $S_{1c}$  分别接在插孔 A 时，组成射极输出；当接在插孔 B 时，组成阻容耦合放大器。

1. 测量射极输出器和阻容耦合放大器的输入阻抗