

第一章 电子线路实验基础知识

(一)、电阻器、电位器：

1. 电阻器

电阻是电子电路常用元件，对交流、直流都有阻碍作用，常用于控制电路电流和电压大小，以下列出的是常规的电阻器实物图。



(1) 电阻器符号、阻值单位

符号	R	
单位	欧姆	Ω
	千欧	$K \Omega$ $10^3 \Omega$
	兆欧	$M \Omega$ $10^3 K \Omega$
	吉欧	$G \Omega$ $10^3 M \Omega$
	太欧	$T \Omega$ $10^3 G \Omega$

(2) 电阻器类型

实际中电阻器有多种类型，常见分类与标示如下表：

	表示符号	材料
分 类 与 代 表 符 号	RT	碳膜电阻
	RTX	小型碳膜电阻
	RI 或 RJ	金属膜电阻
	RIX 或 RJX	小型金属膜电阻

	RY	氧化膜电阻
	Rt 或 RR	热敏电阻
	RX	线绕电阻
注： 底色通常为米色电阻是碳膜电阻；底色通常为天蓝色电阻是金属膜电阻。		

- 线绕电阻器：稳定性好、精密度高、噪声比小、能耐高温、易作成大的额定功定，能承受较大的过载，但体积较大，制造工艺比较麻烦，价格也高，附加电感、电容都比较大，不能用于高频工作电路。
- 碳膜电阻器：稳定性很好、温度系数不大、噪声比很小。（硼碳膜、硅碳膜电阻器的性能均比碳膜电阻器好。）
- 金属膜电阻器：稳定性很高、噪声比很小、能耐高温、温度系数较小。

2. 电阻器的主要技术参数

(1) 电阻器标称值和准确度：

- **电阻器的准确度**是电阻器实际阻值与规定阻值之间的偏差范围。它直接以允许误差的百分数表示。允许偏差为上 0.5%、上 1%、± 2% 的电阻器为精密电阻器。

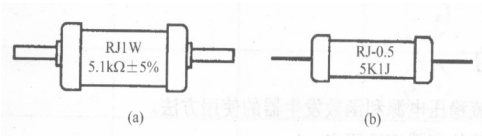
我国现行电阻器标准系列见下表

允许偏差	系列代号	系列值							
±20%	E6	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8		
±10%	E12	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7		
		3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2		
±5%	E24	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0
		2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3
		4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
±2%	E48	100	105	110	115	121	127	133	140
		147	154	162	169	176	187	196	205

		215	226	237	249	261	274	287	301
		316	332	348	365	383	402	422	442
		464	487	511	536	562	590	619	649
		681	715	750	787	825	866	909	953
$\pm 1\%$	E96	略							
$\pm 0.5\%$	E192								

- **电阻器的标称值**应符合上表中所列数值之一或表中所列数值再乘以 10^n ”
(n 为正整数或负整数)。电阻器的阻值和误差级别在出厂时都已打印在电阻器表面。它有用字样表示的，也有用色标表示。

字样表示（直标法）的电阻器，在电阻上直接标称电阻的类型和电阻的阻值。见右图(a)和(b)为 $5.1\text{k}\Omega$



色标法表示的电阻值是在电阻器的一端涂以不同颜色的色环，以表示该电阻器的阻值和允许偏差。普通电阻器常用四色环标称电阻器的阻值和允许偏差。

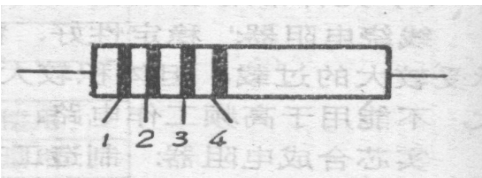


图 四色环电阻器

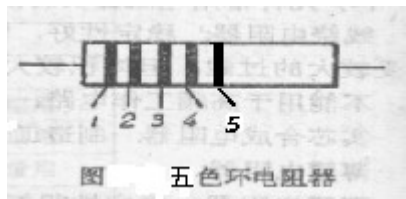
四色环电阻器阻值的标注方法是：从左端开始第一色环是十位数、第二色环是个位数（为有效数字），第三环表示有效数字后有几个 0（即应乘倍数），第四环表示允许偏差值。

四色环所对应的数字意义见表。

内容	第一环	第二环	第三环	第四环
色别	第一位有效数字	第一位有效数字	乘数	允许偏差
黑		0	10^0	
棕	1	1	10^1	$\pm 1\%$

红	2	2	10^2	$\pm 2\%$
橙	3	3	10^3	
黄	4	4	10^4	
绿	5	5	10^5	$\pm 0.5\%$
兰	6	6	10^6	$\pm 0.25\%$
紫	7	7	10^7	$\pm 0.1\%$
灰	8	8	10^8	
白	9	9	10^9	$\pm 5\%$
金			10^{-1}	$\pm 5\%$
银			10^{-2}	$\pm 10\%$
本色				$\pm 20\%$

五色环表示标称阻值和允许偏差用于精密电阻器。从左端开始第一色环是百位数、第二色环是十位数、第三环是个位数（为有效数字），第四表示有效数字后有几个 0（即应乘倍数），第五色环表示允许偏差值。



例：5 色环电阻的颜色排列为红红黑黑棕

则其阻值是 $220 \times 1 = 220 \Omega$ ，误差是 $\pm 1\%$

5 色环电阻通常都是误差误差是 $\pm 1\%$ 的金属膜电阻器。

(2) 额定功率：

额定功率是指在标准大气压和一定的环境温度下，电阻器能长期连续负荷而不改变其性能时的允许功率。在实际使用中，一般都选取额定功率为实际计算值的 3~5 倍。

常用电阻器的额定功率有：1/16W、1/8W、1/4W、1/2W、1W、2W、3W、5W、8W、10W、15W……等。

(3) 抗电强度:

抗电强度是指电阻器的最高工作电压,即电阻器在长时间内工作,而不超过正常负荷时的最大电压。

(4) 稳定性:

影响电阻器稳定性的因素很多,但主要的是温度、湿度和时间等几方面。

(5) 电阻器的噪声:

电阻器的噪声电势来源于热噪声和电流噪声。热噪声是电阻内部物质的热运动所产生的,其值由电阻阻值、温度和工作频带等因素决定。电阻器的阻值越大,工作温度越高,工作频带越宽,则噪声电势越大。电流噪声是由于电流流过电阻时,导电微粒之间的非正常运动引起阻值不稳定所造成的,因此这部分噪声电势取决于电阻的材料及其结构。电阻器的噪声通常以外加一伏直流电压所产生的噪声来衡量,称之为噪声比 E_z

$$E_z = C_z / V$$

式中 C_z 为总噪声电势 (PV); V 为外加直流电压 (V)。

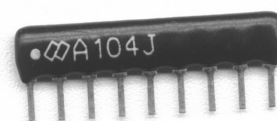
(6) 电阻器的附加参数:任何电阻器不论其导电材料和结构形式如何,由于电阻两端存在电位差,因而都有电容效应。当电流流过电阻时,在其周围要产生电磁场,故也存在电感效应。所以实际的电阻器是电阻、电容和电感的组合。

3. 电位器类型

分 类 与	WH	合成膜电位器
代 表 符	WIW/WJW	微调金属膜电位器
号 W	WY	氧化膜电位器
	WD	导电塑料电位器

4. 电阻排

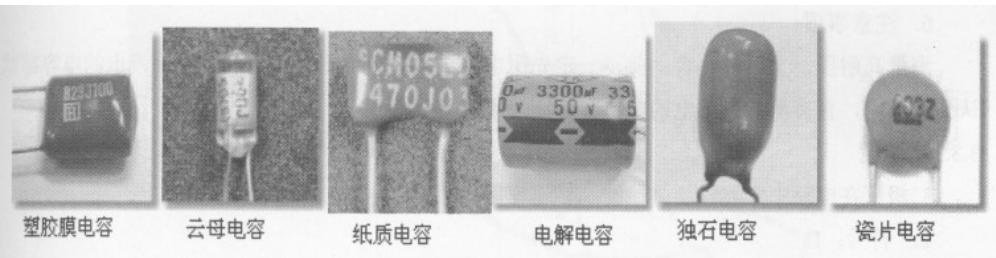
电阻排是将多个电阻的一端连在一起构成的独立电子元件,如图所示是一个将 8 个 $100\text{k}\Omega$ 的电阻一端相连构成的有 9 个引脚的电阻排 $8 \times 100\text{k}\Omega$, 图中白圆点对



应的引脚为公共引脚。

(二) 电容器型号与参数

电容器是电子电路常用元件，在电路中起耦合、滤波、旁路、调谐、振荡等作用。常见电容器实物图。



1. 种类：电容器可分为固定电容器、半可变电容器和可变电容器。

固定电容用途广泛，按其使用的绝缘介质，则无极性的电容器有云母电容器、独石电容器、瓷片电容器和玻璃釉电容器等；有极性的电容器有铝电解电容器、钽（或铌）电解电容器。注意有极性的电容器的正、负极在电路中不能接错。

2. 符号、单位：

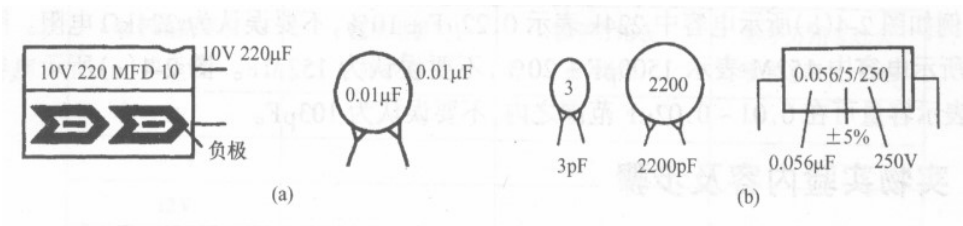
电容器的符号、单位表示如下表

符号	法拉 (F)	毫法 (mF)	微法 (μF)	纳法 (nF)	皮法 (pF)
C	1F	10 ⁻³ F	10 ⁻⁶ F	10 ⁻⁹ F	10 ⁻¹² F

3. 电容器的容量表示法

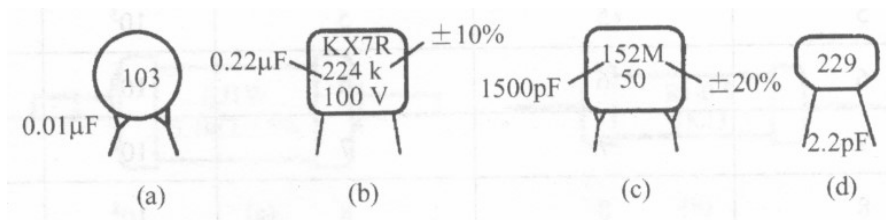
电容器的标注方法有标注单位的直标法、不标注单位的直标法、数码表示法和色码表示法。

● 直标法：如下图



电容器电容量的 p、n、μ、m 表示法用 2~4 位数字和一个字母来标称容量，数字表示有效数值，字母（p、n、μ、m）表示数值的量级。

● **数码表示法：** 图示如下



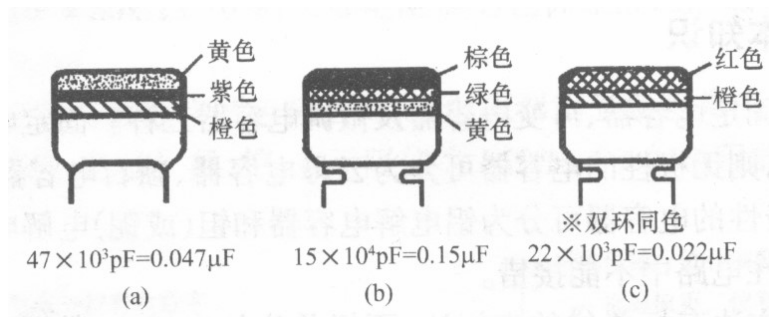
电容器电容量的数码表示法通常为三位数，前两位为有效数字，第三位为 10 的 n 次幂，若不注明单位默认为 pF

例如： $102 = 10.00 \times 100 \text{pF} = 1000 \text{pF} = 1 \text{nF} = 0.001 \mu\text{F}$

$682 = 68 \times 100 \text{PF} = 6800 \text{pF} = 6.8 \text{nF} = 0.0068 \mu\text{F}$

● **色码表示法：**

图示如下，颜色环与数码对应同色标电阻，两位有效数字（第一、二色环），一位（第三色环）是 10 的幂次数字。



5. 检测方法

a. 用万用表的电容档功能检测

把万用表的功能旋钮转至电容测试档位，在把被测电容插入测试孔，读出电容值可判定电容器的好坏。

b. 用万用表的电阻档功能检测

对于小容量、无极性的电容器（包括可变电容器既单连、双连或微调电容），一般万用表的电阻档只能测一下它的极间是否短路、断路或漏电。可用万用表 $\Omega \times 1K$ 档或 $\Omega \times 10K$ 档。当两个表笔棒接触电容器的两个引出脚时，指针应指在位置处不动（对于容量为几百 μF 的电容器，指针很快地摆动一下，最后指向 0 处。可变电容器应观察指针随动片的转动有什么变化）。如指针有读数，说明该电容器严重漏电，如指针指在 0 Ω 位置，表明该电容器内部的介质已击穿，不能使用。

对于有极性的电解电容，一般容量较大，允许有一定的漏电流，用万用表的电阻档除了可判断它是否短路。断路外，还能估测出它的漏电流和电容量。把万用表拨到 $\Omega \times 100$ 档或 $\Omega \times 1K$ 档（测量前应将电容器放电，把电容器的两脚相碰一下，以中和电容器内部残存的电荷），红表笔接电容器负极，黑表笔接正极时表针将迅速向有摆动一个角度，然后慢慢退回。待表针不动后，指示的电阻值越大，表明漏电流越小。从指针摆动的幅度还可以估算出它的电容量，见下表。

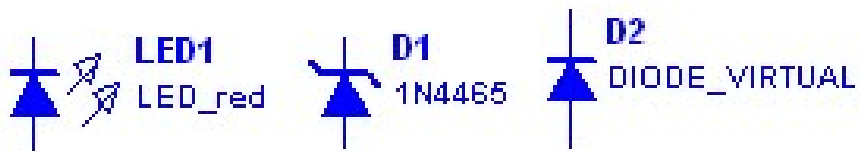
测量各种电容器指针摆动范围，估算电容器的电容量

电阻档	<10 μF	20 $\mu F \sim 50\mu F$	>100 μF
$\Omega \times 100$	略有摆动	小于 1/5	大于 1/5
$\Omega \times 1K$	小于 1/5	小于 3/5	大于 3/5

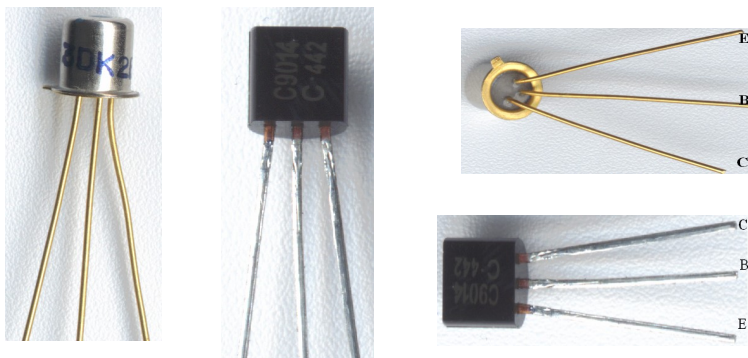
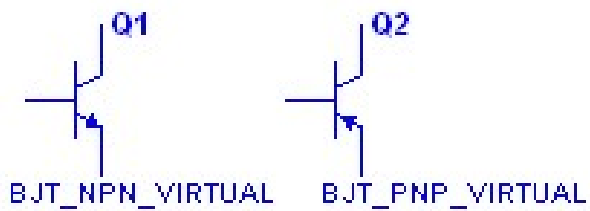
6. 注意事项

测量高耐压，大容量电容之前，一定先用电阻放一下电再测量，因为未确定没电的电容都默认为充过电，直接测量充过电的电容会打坏万用表。

(三) 二极管型号与参数



(四) 三极管型号与参数



(五) 运算放大器型号与参数

第三章 模拟电子线路实验内容

模拟电子线路实验内容包括二极管特性及应用、单级三极管放大电路、双级三极管负反馈放大电路、运算放大器应用（一，二）五个实验内容。

实验一 二极管特性及其应用

一、实验目的

- 了解半导体二极管在电子电路中的多种用途
- 掌握电子电路实验仪器的基本使用方法
- 熟悉和掌握示波器、信号发生器的正确使用方法。

二、概述

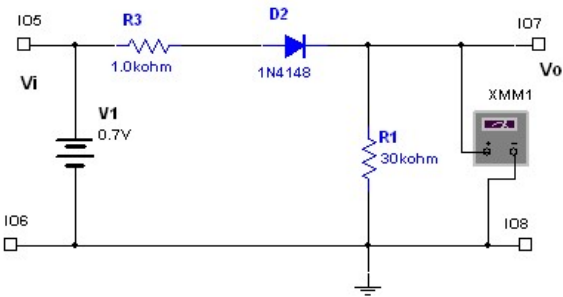
二极管的运用基础是二极管的单向导电特性，因此，在应用电路中，关键是判断二极管的导通与截止。二极管导通时一般用电源 $U_b=0.7V$ （硅管，锗管用 $0.3V$ ）。利用二极管的单向导电特性，可以构成限幅电路和整流电路，还可利用二极管的反向击穿部分特性制成各种稳压管，实现对电子电路的稳压保护等等。

三、实验内容

1、二极管特性测试与分析

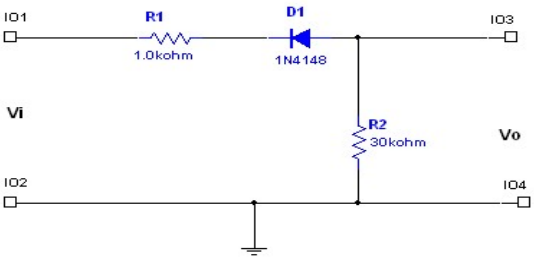
(1)、二极管单向导电性

(a) 实验电路如下($V1$ 是直流稳压源)，给电路分别输入不同正向直流电压 V_i (见下表)，用万用表分别测量输出端电压，并分析结果。



正向输入直流电压 V_i	0.2V	0.5V	0.7V	1.0V	1.5V	2.0V	2.5V	3V
输出电压 V_o								

(b) 实验电路如下，给电路（二极管）分别输入大小不同反向直流

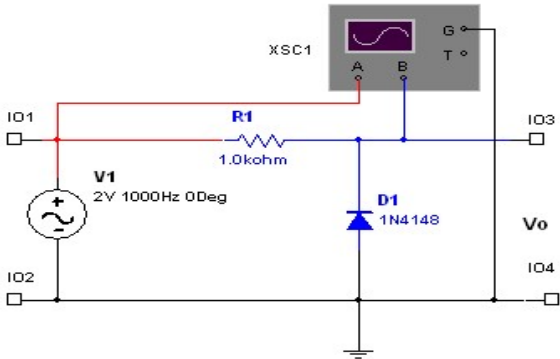


电压 V_i (见下表)，用万用表分别测量输出端电压，并分析结果。

反向输入直 流电压 V_i	0.5V	1.0V	1.5V	2.0V	2.5V	3.0V	3.5V	4.0V
输出电压 V_o								

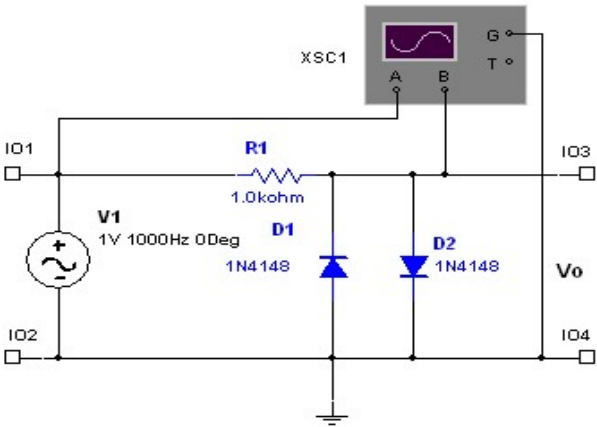
2、限幅特性

(a) 实验电路如下(图中 V1 是信号源，XSC1 是双踪示波器，示波器的 A、B 是通道 A 和 B，G 是信号地)，用信号源给电路输入频率为 $f=1\text{KHz}$ ，电压 V_i 为不同有效电压值 V_i (见下表) 的正弦波信号，用双踪示波器观察电路相应的输入/输出波形，并画出相应的波形图，并分析结果。



输入交流 有效电压	0.2V	0.5V	0.7V	1.0V	1.5V	2.0V	2.5V	3.0V
输出电压 波形								

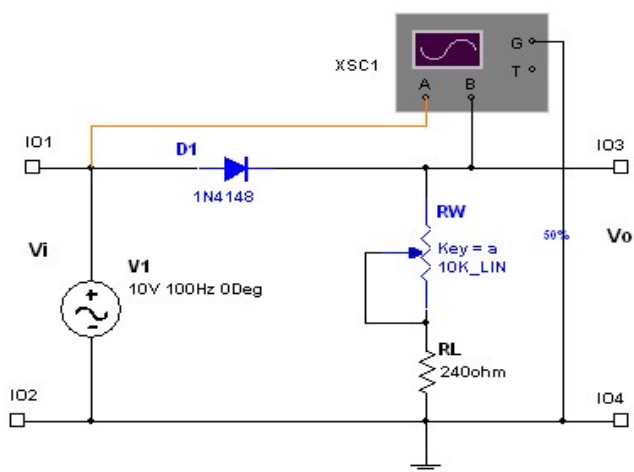
(b) 实验电路如下 (条件同 a)



输入交流有效电压	0.2V	0.5V	0.7V	1.0V	1.5V	2.0V	2.5V	3.0V
输出电压波形								

3、半波整流电路

实验电路如下，用信号源给电路输入频率分别为 100Hz、1000 Hz， $V_i=10V$ (有效值) 正弦波信号， $R_L=100\ \Omega$ ， $R_W=10K\ \Omega$ 调节 R_W ，测出 V_o 的值，用双踪示波器观察电路相应的输入/输出波形，并记录相应的波形图，分析并说明输出波形随 R_W 变化情况。



四、实验报告

1. 整理实验测量的数据，分析结果的正确性。
2. 通过本实验有那些收获与建议。

五、预习内容

请预习实验指导书“第一章和第二章。

实验二 三极管单级交流放大电路

一、实验目的

1. 通过实验搞清楚电路中各元件与静态工作点的关系。学习晶体管放大器静态工作点的调整与测量方法。
2. 分析、观察工作点对放大器动态范围的影响。
3. 搞清电路中各元件对放大器性能指标的影响。掌握放大器诸性能指标的测量方法。
4. 熟悉 EDA 工具软件 Multisim 设计、编辑、仿真电路的基本方法。

二、概述

单级阻容耦合基本放大器电路如图

3.1 所示，该电路为共射极放大电路。

1. 工作点的研究

放大器静态工作点是指放大器输入端不加输入信号时，流过晶体管的直流电流 I_{CQ} 、 I_{BQ} 及晶体管两端的直流电压

V_{CEQ} 。由图可知

$$I_{BQ} = (E_C - V_{BE}) / R_b \approx E_C / R_b \quad (V_{BE} \ll E_C)$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} + I_{CEQ} \approx \beta I_{BQ} \quad (I_{CEQ} \ll \beta I_{BQ})$$

$$V_{CEQ} = E_C - I_{CQ} R_c$$

式中 I_{BQ} 为基极静态工作电流； I_{CQ} 为集电极静态工作电流； V_{CEQ} 为集电极静态工作电压。

由上述式中可以看出，晶体管特性、电源电压 E_C 、集电极负载电阻 R_c 及基极电流 I_B 的改变都会导致静态工作点的改变。

当放大器输入信号时，输出信号 U_c 、 I_c 总是围绕工作点 Q 变化、如图 3.2 所示。若 I_{BQ} 偏大，工作点偏高，有可能发生饱和失真；若 I_{BQ} 的偏小，工作点偏低，有可能发生截止失真。因此要使放大器正常工作，必须将放大器工作点调到合适的位置。一旦放大器发生故障也应先检查工作点是否正常。

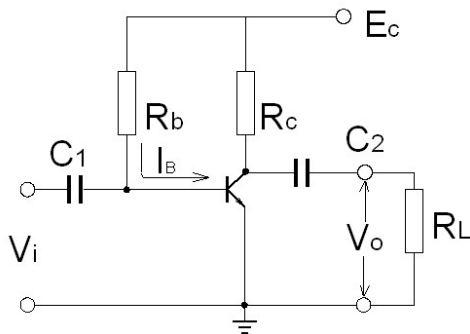


图 3.1 阻容耦合共射极放大器电路

放大器工作点的选择：在输出信号不失真的前提下，如果希望耗电少，则工作点应选低些；如果不考虑耗电量而要求放大倍数高些，则应将工作点选在大 β 区域；如果要求输出动态范围最大，则放大器的工作点应选在交流负载线的中点。

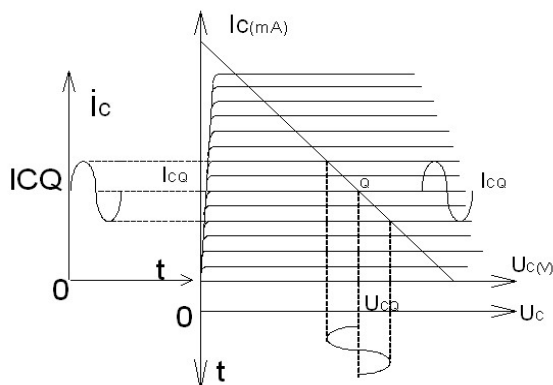


图 3.2 工作点与输出波形图

2. 放大器电压放大倍数 A_v 。

在放大器中频段（即不考虑耦合电容、分布电容、晶体管结电容的影响），放大器的小信号 h 参数简化等效电路如图 3.3 所示。

图中 $R_L' = R_L // R_C$

在一般情况下 $R_b \gg h_{ie}$, $1/h_{oe} \gg R_L'$

则： $A_v = -\beta R_L' / h_{ie}$

$$h_{ie} = r_{bb} + (1 + \beta) \times (26 / I_E)$$

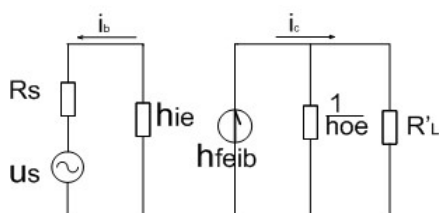


图 3.3 放大器小信号 h 参数简化等效电路

由上述式中可知，当 β 、 I_E 、 R_L' 变化时， A_v 也随之变化。

3. 输入输出电阻测量

输入、输出阻抗的测量，有电流法、电阻代替法，用脉冲信号测量、用扫频技术测量等方法。这里只介绍用电流法测量输入、输出电阻。

(1) 输入电阻 r_i ：输入电阻 r_i 的大小表示该放大器从信号源或前级获取电流的多少也就是该放大器的前级的负载。为了测量输入电阻，在输入电路中串接一已知电阻 R ，如图 3.4 所示

由图 3.4 中得

$$I_i = (V_A - V_B) / R$$

$$r_i = V_B / I_i = V_B R / (V_A - V_B)$$

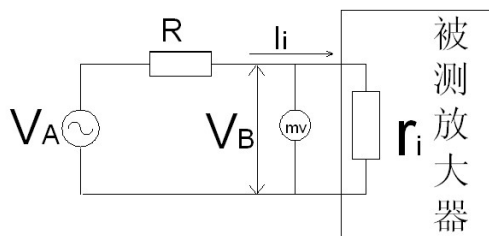


图 3.4 测量输入电阻原理图

(2) 输出电阻 r_o : 放大器的输出电阻反映该放大器带负载能力的大小。输出电阻 r_o 越小, 带负载能力越强。输出电阻测量原理图如图 3.5 所示。不接负载测量输出开路电压 V_0 , 然后接入负载电阻 R_L , 再测量输出电压 V_{OL} 。

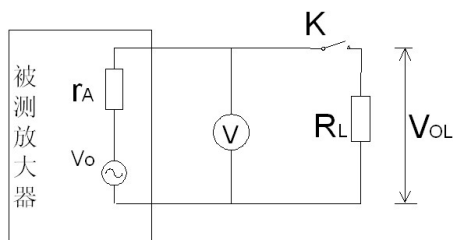


图 3.5 测量输出电阻原理图

$$V_{OL} = V_0 R_L / (r_o + R_L)$$

则放大器输出电阻 r_o 为

$$r_o = (V_0 - V_{OL}) R_L / V_{OL}$$

三、实验内容和步骤

(一)、基本放大器电路工作状态调整与参数测量

实验电路如下图所示

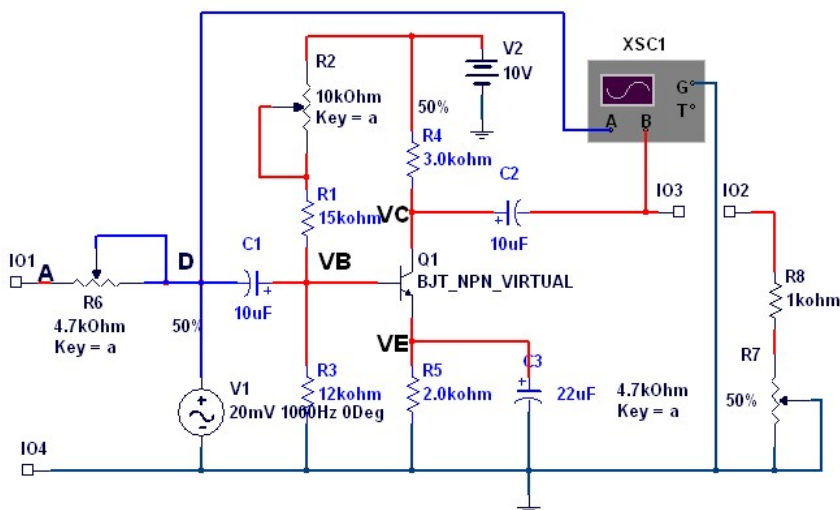


图 3.6 单级交流放大器电路原理图

1. 电路参数对放大器工作点的影响

(1) R_{b1} 对工作点的影响

测试电路设置条件：电源电压 E_C 为 10V，将电位器 W_2 旋至最大或最小，测量晶体管集电极、基极和发射极对地电压 V_C 、 V_B 、 V_E ，并计算 V_{BE} 、 V_{CE} 和 I_C 的值。

R_{b1}	V_C (v)	V_B (v)	V_E (v)	V_{CE} (v)	V_{BE} (v)	I_C (mA)
R_{b1min}						
R_{b1max}						

(2) E_C 对工作点的影响

测试电路设置条件：将 R_{b1} 调至 $50K\Omega$ ，改变电源电压 E_C ，测量 V_C 、 V_B 、 V_E ，并计算 V_{BE} 、 V_{CE} 和 I_C 。

E_C (v)	V_C (v)	V_B (v)	V_E (v)	V_{CE} (v)	V_{BE} (v)	I_C (mA)
10						
12						
15						

2. 工作点对波形的影响

测试电路设置条件： $E_C=10V$ ， $R_L=\infty$ （开路）， $R_{b1}=R_{b1max}$ ， $V_i=20mV_{P-P}$ ， $f=1KHz$ ，观察并记录输出波形（按比例画出波形），逐渐减小 R_{b1} 直至 $R_{b1}=R_{b1min}$ ，观察输出波形有何变化，并记录输出波形，并写出结论。

3. 放大器最大不失真输出的调整

测试电路设置条件： $E_C=10V$ ， $R_L(W_3)=4.7K\Omega$ ，当输入电压 V_i 由小增大时，放大器输出波形将先出现饱和失真（或截止失真），这表明放大器静态工作点不在交流负载线中点。调节 W_2 使输出波形失真消失。然后再增大 V_i ，又出现失真，再调节 W_2 使失真消失。如此反复调节，直至输入电压稍有增加，输出波形同时出现饱和与截止失真。测量这时放大器的输出波形最大而不失真时的输入电压 V_{imax} 和输出电压 V_{Omax} ；然后去掉交流输入信号，测量工作状态 V_C 、 V_B 、 V_E 。

4. 放大器电压放大倍数 A_v 测试

放大器电压放大倍数为输出电压 V_o 与输入电压 V_i 之比，即

$$A_v = V_o / V_i$$

放大倍数的测试电路如**图所示**

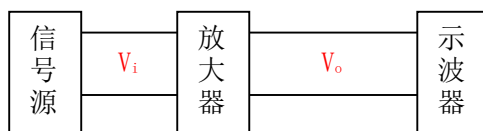


图 3.7 放大倍数测试电路

注意：放大倍数的测量必须在不失真的条件下进行，否则测得的放大倍数将无意义。 V_i 和 V_o 分别用万用表毫伏档测试。

在实验内容 3 所调定的工作状态下，输入信号 $V_i=10\text{mV}_{\text{P-P}}$ ， $f=1\text{kHz}$ ，改变负载电阻 R_L (W_3)，测量 V_{OL} ，并计算 A_v 值。

R_L (k Ω)	V_{OL} (V)	A_v
2		
3		
4.7		

5. 测量放大器输入电阻 r_i

在实验内容 3 所调定的工作状态下，输入信号加到 A 端， $f=1\text{kHz}$ ，调节信号源输出电压，使 D 点电压为 $10\text{mV}_{\text{P-P}}$ ，测量 V_A 和 W_1 值，计算出放大器输入电阻 r_i 。

V_A (mV)	V_D (mV)	W_1 (k Ω)	r_i (k Ω)
	10		

6. 测量放大器输出电阻 r_o

在实验内容 3 所调定的工作状态下，输入信号 $V_i=10\text{mV}$ (有效值)， $f=1\text{kHz}$ 。测量负载开路时的输出电压 V_o 和接上负载 $R_L=4.7\text{k}\Omega$ 时的输出电压 V_{OL} ，计算

放大器的输出电阻 r_o 。

$R_L(k\Omega)$	$V_o(V)$	$V_{OL}(V)$	$r_o(k\Omega)$
∞		/	
4.7	/		

(二)、设计单级共射极交流电压放大电路

电路器件：三极管为 NPN 型， β 为 100；

$R_s=200\Omega$, $R_L=5K\Omega$, $R_c=3K\Omega$, $R_E=2K\Omega$ ；

基极上下偏置电阻 R_{b1} R_{b2} 自定（ $10K\Omega \sim 100K\Omega$ ）

电源工作电压为 10V

输入信号频率 $f=2kHz$, $V_{i_{min}}=1mV_{P-P}$, $V_{i_{max}}=30mV_{P-P}$ ；

基本要求：保证输出信号不失真时，电压放大倍数不小于 50。用 EDA 工具软件 Multism2001 设计该电路，并用计算机进行仿真（确定电路中个元件的参数值）。并测出：

①、电路的最大不失真的输入与输出电压。

②、 $V_i=10mV_{P-P}$ 时的电压放大倍数 A_v 、该放大器的输出电阻 r_o 和输入电阻 r_i 。

四、实验报告要求

1. 整理实验数据与理论计算值相比较
2. 分析实验结果
3. 通过本实验有那些收获与建议

五、预习要求

1. 复习基本放大器的工作原理，搞清电路各元件对工作点及性能指标的影响
2. 计算该放大器的电压放大倍数和输入、输出电阻。
3. 了解放大器工作点的调试方法及放大器性能指标的测量方法。
4. 阅读 EDA 工具软件 Multism2001 的使用说明

实验三 三极管负反馈交流放大电路

一、实验目的

1. 加深对负反馈对放大器性能的理解。
2. 学习电压串联负反馈放大器的调试和测量方法。
3. 学会 EDA 工具软件 Multisim 设计、仿真、调试基本负反馈放大器的方法。

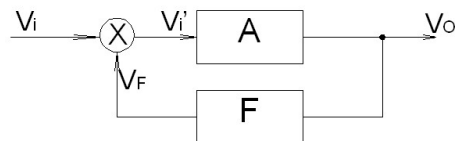
二、概述

放大器引入负反馈后，将使放大器放大倍数下降，却使放大器其他性能得到改善，它是以牺牲放大倍数来改善其他性能，反馈放大器方框图如下图所示。

1. 负反馈对放大器放大倍数的影响

图中反馈电路的反馈系数 F 为：

$$F = V_F / V_O$$



反馈放大器方框图

无反馈的基本放大器的放大倍数 A_V 为：

$$A_V = V_O / V_i' \quad (\text{即开环放大倍数})$$

引入负反馈后， $V_i' = V_i - V_F$ ，则放大器的放大倍数 A_F 为：

$$A_F = V_O / V_i = V_O / (V_i' + V_F) = A_V / (1 + F A_V)$$

或中 $(1 + F A_V)$ 称为反馈深度， $1 + F A_V > 1$ ，则 $A_F < A_V$ ，即放大器引入负反馈后，使放大器闭环放大倍数降低为开环放大倍数的 $1 / (1 + F A_V)$ 。

2. 负反馈对放大倍数稳定性的影响

$$A_F = A_V / (1 + F A_V)$$

对 A_F 求导，得

$$\begin{aligned} dA_F / dA_V &= 1 / (1 + F A_V)^2 = A_F = [A_V / (1 + F A_V)] \times [1 / (A_V (1 + F A_V))] \\ &= A_F / [A_V (1 + F A_V)] \end{aligned}$$

$$dA_F / A_F = 1 / (1 + F A_V) \times dA_V / A_V$$

由上式可知，引入负反馈后放大器放大倍数下降了 $(1 + F A_V)$ 倍，而放大倍数的稳定性却提高了 $(1 + F A_V)$ 倍。

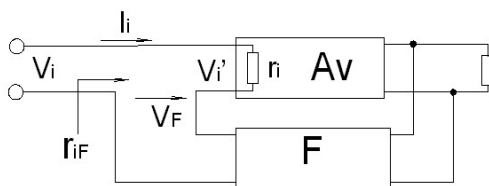
3. 输入端串联负反馈对放大器输入电阻的影响

输入端串联负反馈放大器方框图如下所示：基本放大器的输入电阻 r_i 为：

$$r_i = V_i' / I_i$$

引入输入端串联负反馈后，放大器的输入电阻 r_{iF} 为：

$$\begin{aligned} r_{iF} &= V_i / I_i \\ &= (V_i' + V_F) / I_i \\ &= (V_i' + F A_v V_i') / I_i \\ &= (V_i' / I_i) \times (1 + F A_v) = r_i (1 + F A_v) \end{aligned}$$



输入端串联负反馈放大器方框图

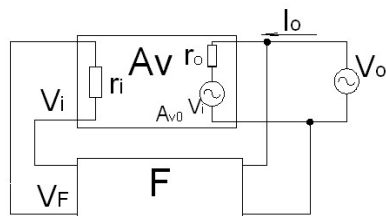
由上式可知，输入端引入串联负反馈使放大器输入电阻增大为无反馈时的 $(1 + F A_v)$ 倍。而和输出端的反馈方式无关。

4. 输出端电压负反馈对输出电阻的影响

输出端电压负反馈求输出电阻的原理方框图如下图所示，

将输入信号短路 ($V_i = 0$)。在输出端加上交流电压 V_o ；就有反馈电压 $V_F = F V_o$ 被送到放大器输入端，故有 $V_i' = -V_F$ ，因此在输出端就产生一个等效电动势 $A_{v0} V_i' = -A_{v0} V_F$ (式中 A_{v0} 为负载开路时，基本放大器的放大倍数)。在不考虑反馈网络对 I_o 的分流作用，则有

$$\begin{aligned} V_o &= I_o r_o + A_{v0} V_i' \\ &= I_o r_o - A_{v0} V_F \\ &= I_o r_o - A_{v0} F V_o \end{aligned}$$



电压负反馈求输出电阻原理框图

式中 r_o 为基本放大器输出电阻。

由上式可得，引入电压串联负反馈后，放大器的输出电阻 r_{oF} 为：

$$r_{oF} = V_o / I_o = r_o / (1 + A_{v0} F)$$

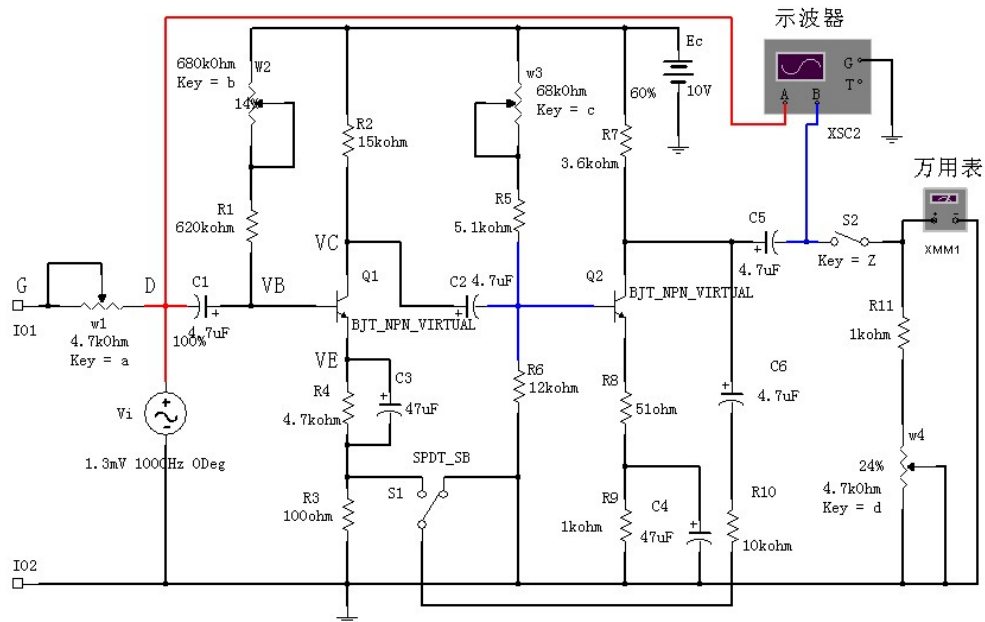
即引入电压串联负反馈后，输出电阻比无反馈时减小了 $(1 + A_{v0} F)$ 倍。

5. 放大器引入负反馈还可以减小非线性失真、扩展通频带等。

三、实验内容和步骤

(一)、负反馈放大器电路调整与参数测量

电压串联负反馈放大器电路如下图所示。



1. 调整放大器静态工作点

输入信号频率 $f=1\text{KHz}$ ，断开反馈（将 S_1 开关拨向接地），接通 S_2 ，使负载电阻 $R_L=W_{4\text{max}}=4.7\text{K}\Omega$ 。用示波器观察输出波形。逐渐增大输入信号，适当调节 W_2 和 W_3 ，把放大器的静态工作点调到负载线的中点（即当输入信号稍有增加时，输出电压波形的正负幅值同时出现失真）。去掉输入信号，并将放大器输入端短路，测量并记录放大器的静态工作状态。

各极对地电压	Q1	Q2
$V_C(\text{V})$		
$V_B(\text{V})$		
$V_E(\text{V})$		

注：以下实验都在该调定的状态下进行。

2. 电压串联负反馈对放大倍数的影响

输入信号 $V_i=5\text{mV}_{\text{P-P}}$, $f=1\text{KHz}$, 负载电阻 $R_L=W_{4\text{max}}=4.7\text{K}\Omega$, 测量、记录、有无反馈时的输出电压 V_o , 并计算 A_v 和 A_{vF} 。

	$V_o(\text{V})$	$V_{R3}(\text{mV})$	$F=V_F/V_o$	A_v	A_{vF}	
					计算值	实测值
无反馈		/	/		/	/
有反馈				/		

$$V_F=I_F R_3=[(V_o-V_{R3})/R_{10}]R_3$$

3. 负载变化对放大器放大倍数的影响

输入信号 $V_i=5\text{mV}_{\text{P-P}}$, $f=1\text{KHz}$ 。改变负载电阻 R_L , 测量并记录有、无反馈时的 V_o 值。

	$R_L=4.7\text{K}\Omega$			$R_L=3\text{K}\Omega$			dA_v/A_{v1}	dA_{vF}/A_{vF1}	
	$V_o(\text{V})$	A_{v1}	A_{vF1}	$V_o(\text{V})$	A_{v2}	A_{vF2}		计算值	实测值
无反馈			/			/		/	/
有反馈		/			/				

4. 电压串联负反馈对输入电阻的影响

输入信号 V_s 从 G 端输入, $f=1\text{KHz}$, 调节输入信号。使 D 点的交流信号 $V_i=5\text{mV}_{\text{P-P}}$, 测量有、无反馈时的 V_s 值。并由测得的两电压值和 W_1 值计算出有、无反馈时的输入电阻。

	$V_s(\text{mV})$	$W_1(\text{K}\Omega)$	$r_i(\text{K}\Omega)$	$r_{iF}(\text{K}\Omega)$	
				计算值	实测值
无反馈				/	/
有反馈			/		

5. 电压串联负反馈对输出电阻的影响

输入信号 $V_i = 5\text{mV}_{\text{P-P}}$, $f = 1\text{KHz}$, 在有、无反馈的情况下, 分别测量空载和有载时的输出电压 V_o , 根据测得的 V_o 值求出输出电阻值。

	$R_L = \infty$	$R_L = 4.7\text{K}\Omega$	$R_o (\text{K}\Omega)$	$r_{iF} (\text{K}\Omega)$	
	$V_o (\text{V})$	$V_o (\text{V})$		计算值	实测值
无反馈				/	/
有反馈			/		

(二)、设计电压串联负反馈放大电路

电路器件: 三极管为 NPN 型, β 为 100;

$R_s = 200\Omega$, $R_L = 5\text{K}\Omega$, $R_c = 2\text{K}\Omega$, $R_E = 2\text{K}\Omega \sim 12\text{K}\Omega$;

基极上下偏置电阻 R_b R_b 自定 ($10\text{K}\Omega \sim 680\text{K}\Omega$)

电源工作电压为 10V

输入信号频率 $f = 2\text{kHz}$, $V_{i_{\min}} = 1\text{mV}_{\text{P-P}}$, $V_{i_{\max}} = 50\text{mV}_{\text{P-P}}$;

放大器电路基本要求: 保证输出信号不失真时, 电压放大倍数不小于 30。

用 EDA 工具软件 Multism2001 设计该电路, 并用计算机进行仿真 (确定电路中个元件的参数值)。并测出:

①、电路的最大不失真的输入与输出电压。

②、 $V_i = 5\text{mV}_{\text{P-P}}$ 时的电压放大倍数 A_v 、该放大器的输出电阻 r_o 和输入电阻 r_i

四、实验报告要求

1. 整理测试数据, 与计算值相比较, 分析产生误差的原因。
2. 总结负反馈对放大器性能的影响。
3. 通过本实验有那些收获与建议。

五、预习要求

1. 复习负反馈放大器工作原理及负反馈对放大器性能的影响。
2. 复习放大器输入、输出电阻的测量方法。
3. 阅读 EDA 工具软件 Multism2001 的使用说明

实验四 运算放大器应用（一）

一、实验目的

熟悉和了解运算放大器的参数和性能

熟悉和掌握运算放大器在比例运算、加法运算、积分及微分方面的应用。

二、实验原理说明概述

（一）、概述

运算放大器是用反馈控制其特性的直接耦合高增益放大器。它可以针对不同的应用，通过反馈网络的设计，以产生各种转移函数。运算放大器能够从直流到几兆赫的频率范围内放大，控制或产生任一种正弦波或非正弦波：能够进行加、减、乘、除、积分、微分等所有经典运算。因而在控制系统、信号处理、测试仪表中都得到广泛应用。

利用运算放大器的理想特性，可得出两条基本定则：

（1）运算放大器输入端不吸取电流。

（2）两输入端之间的电压为零。

利用这两条基本定则可以大大简化运算放大器电路的设计。

（二）、运算放大器应用举例：

1. 反相比例放大并倒相器、反相器）

反相比例放大器电路见下图反馈阻抗和输入端外接阻抗均为纯电阻，则有

$$V_o = -(R_F/R_i) V_i$$

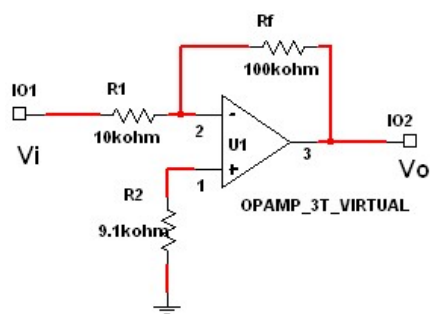


图 反相比例放大器

即输出信号 V_o 等于输入信号 V_i 乘以比例系数 R_F/R_i 后反相，改变 R_F 和 R_i 的大小，就可改变其比例关系。

为了使运算放大器两个输入端直流电阻保持平衡，电路要求 $R_2 = R_F // R_i$ 。

2. 同相放大器（电压跟随器）

同相放大器电路见下图。输出电压 V_o 和输入电压 V_i 的关系为：

$V_0 = -(1 + R_F/R_1) V_i$
 当 $R_F = 0$ 时, $V_0 = V_i$, 电路即为
 跟随器。

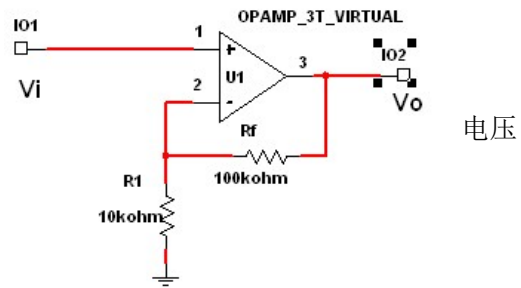


图 同相放大器

3. 求和放大器（加 / 减放大器、加权放大器、加法器、减法器）

求和放大器电路见下图输出电压 V_0 和输入电压 V_i 之间的关系为：

$$V_0 = A_{Vf1}V_1 + A_{Vf2}V_2 + A_{Vf3}V_3 + A_{Vf4}V_4 + A_{Vf5}V_5 + A_{Vf6}V_6$$

式中

$$A_{Vf1} = V_0/V_1 = -R_F/R_1$$

$$A_{Vf2} = V_0/V_2 = -R_F/R_2$$

$$A_{Vf3} = V_0/V_3 = -R_F/R_3$$

$$A_{Vf4} = V_0/V_4 = [R_C / (R_C + R_4)] (1 + R_F/R_X)$$

$$R_C = R_5 // R_6 // R_P$$

$$R_X = R_1 // R_2 // R_3 // R_n$$

$$A_{Vf5} = V_0/V_5 = [R_D / (R_D + R_5)] (1 + R_F/R_X)$$

$$R_D = R_4 // R_6 // R_P$$

$$A_{Vf6} = V_0/V_6 = [R_E / (R_E + R_6)] (1 + R_F/R_X)$$

$$R_E = R_4 // R_5 // R_P$$

当 $R_1 // R_2 // R_3 // R_F$ 之值大于 $R_4 // R_5 // R_6$ 时, 则不用 R_P , 而要用 R_n , 选 R_n 使得

$$R_1 // R_2 // R_3 // R_F // R_n = R_4 // R_5 // R_6$$

当 $R_1 // R_2 // R_3 // R_F$ 之值小于 $R_4 // R_5 // R_6$ 时, 则不用 R_n , 而要用 R_P , 选 R_P 使得

$$R_1 // R_2 // R_3 // R_F = R_4 // R_5 // R_6 // R_P$$

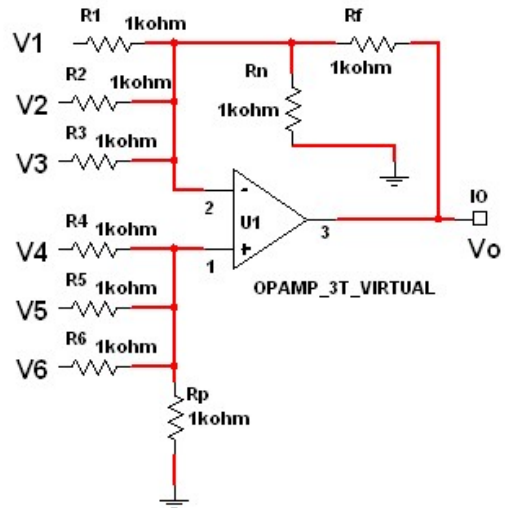
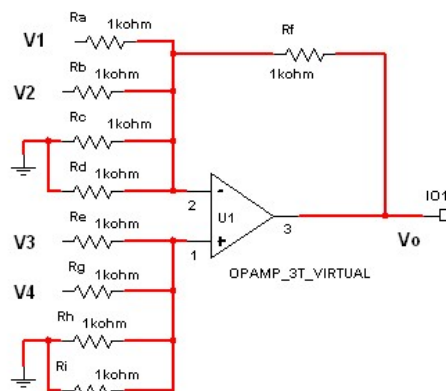


图 求和放大器

采用上述方法计算电阻值较为复杂，可采用下图所示的对称法构成加减法电路较为方便。所谓对称法，是指将电阻接入到某一输入端，且在其上加输入电压，而在相对应 的另一输入端与地之间也应接一个相同阻值的电阻的方法。

$$V_0 = (A_{vf3}V_3 + A_{vf4}V_4) - (A_{vf1}V_1 + A_{vf2}V_2)$$



对称法加减运算电路

4. 积分器（积分放大器、累积放大器、定积分电路、模拟积分器、低通滤波器）
运算放大器的反馈阻抗为电容，输入端外接阻抗为电阻便组成积分器，电路见图

输出电压 V_0 和输入电压 V_i 的关系为：

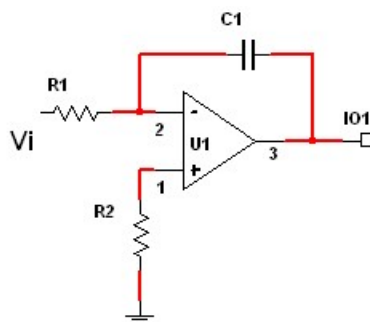
$$V_0 = -(1/R_1C) \int V_i dt$$

当输入信号为一阶跃电压 V_m 时，则

$$V_0 = -(1/R_1C) V_m t$$

即输出电压 V_0 和时间 t 成正比。

为使运算放大器两个输入端直流电阻保持平衡，电路要求 $R_2 = R_1$ 。



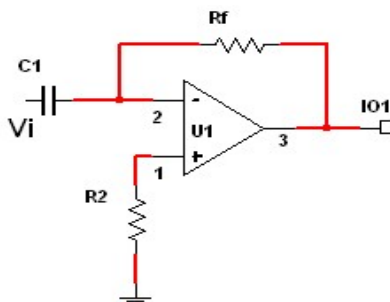
5. 微分器（微分放大器、一阶微分电路、高通滤波器）

运算放大器反馈阻抗为电阻，输入端外接阻抗为电容便组成微分器。电路见图。

输出电压 V_0 和输入电压 V_i 的关系为：

$$V_0 = -R_1C (dV_i/dt)$$

当输入电压 V_i 为一阶跃信号时输出电压 V_0 便为一窄尖脉冲。它反映了 V_i 对时间的微分关系。

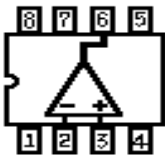


三、实验内容与要求

实验所用运放采用 $\mu A741$ 型通用集成运放。 $\mu A741$ 是单片高性能内补偿运算放大器，具有较宽的共模电压范围。该器件的主要特点是：不需要外部频率补偿；具有短路保护功能；失调电压调到零的能力；较宽的共模和差模电压范围；功耗低。实验所用运放采用 8 引脚 DIP 封装,下图为其顶视封装。

各管脚功能如下：

- 1、5:调零端
- 2: 反相输入端
- 3: 同相输入端
- 4:-VEE
- 6:输出
- 7:+VCC
- 8:空脚



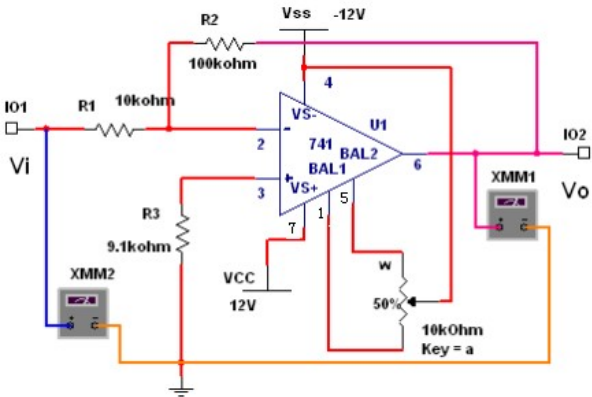
1. 反相比例放大器

安装下图所示的反相比例放大器。

1) 将输入端接地 ($V_i=0$)，调节调零电位器 W，使输出端电位为零。
(XMM 是万用表)

2) 输入端输入正负不同直流电压
(见下表)，测量大器的实际放大输出端 V_o 的对应值，并求出放倍数。

(注意： V_o 的测量值必须要在放大器的线性范围之内。)



表

V_i	0. 10V	0. 50V	1. 0V	-0. 10V	-0. 5V	-1. 0V	1. 5V
V_o							
A_v							

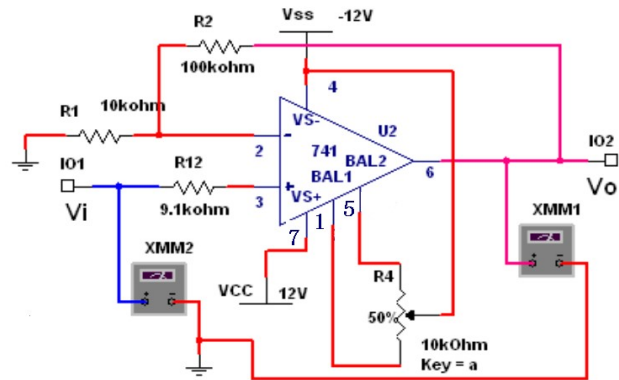
3) 输入端输入不同电压交流信号 $V_{i_{p-p}}$ ， $f=1kHz$ ，测量输出端 V_o 的对应值。求出放大器的实际放大倍数。(注意： V_o 的测量值必须要在放大器的线性范围之内。)

V_{ip-p}	5mV	50mV	100mV	500mV	1.0V	1.5V
V_o						
A_v						
V_o 波形						

2. 同相比例放大器

安装下图所示的同相比例放大器。

- 1) 将输入端接地 ($V_i=0$)，调节调零电位器 W，使输出端电位为零。
- 2) 输入端输入正负不同直流电压 (见下表)，测量输出端 V_o 的对应值，并求出放大器的实际放大倍数。(注意: V_o 的测量值必须要在放大器的线性范围之内。)



表

V_i	0.10V	0.50V	1.0V	-0.1V	-0.5V	-1.0V	1.5V
V_o							
A_v							

- 3) 输入端输入不同电压交流信号 V_{ip-p} , $f=1\text{kHz}$ ，测量输出端 V_o 的对应值。求出放大器的实际放大倍数。(注意: V_o 的测量值必须要在放大器的线性范围之内。)

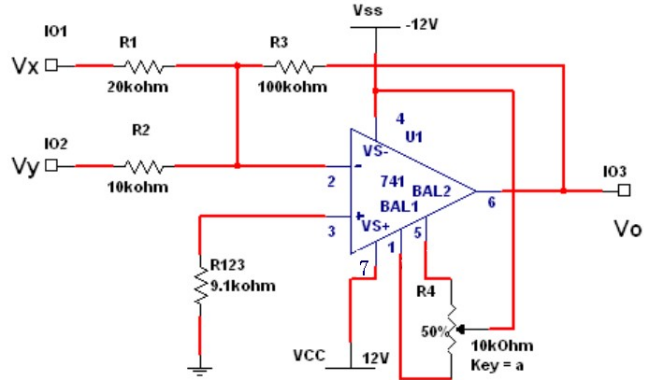
V_{ip-p}	5mV	50mV	100mV	500mV	1.0V	1.5V
V_o						
A_v						

3. 反相加法器

安装下图所示的反相加法器电路。

1) 将输入端接地 ($V_i=0$)，调节调零电位器 W，使输出端电位为零。

2) 在输入端 (V_x, V_y) 输入正负不同直流电压，测量输出端 V_o 的对应值。(注意： V_o 的测量值必须要在放大器的线性范围之内。)



V_x	0.5V	1.0V	1.0V	-0.5V	-1.0V
V_y	0.1V	0.5V	1.0V	-0.1V	-0.5V
V_o					

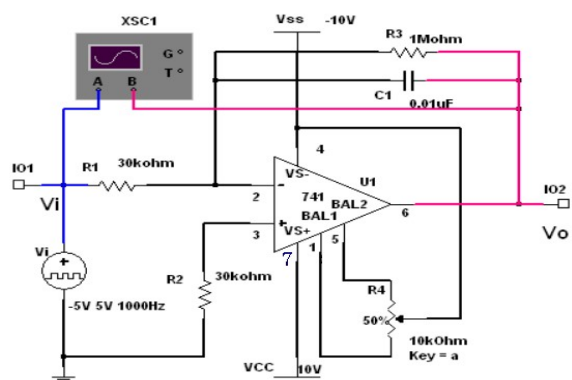
4. 积分器

安装右图所示的积分器电路。

1) 将输入端接地，积分电容 C 短路，调节调零电位器 W，使输出端 V_o 为零电平。

2) 去掉积分电容短路线，输入端 V_i 加入连续的方波信号 ($V_{ip-p} = 6V, f = 1kHz$)，用示波器观察、测量并记录输入 V_i 和输出 V_o 的波形参波 (周期、脉冲宽度、幅度及电平)。

3) 根据测得的输入信号波形参数和电路参数，计算出积分器输出波形的参数，并与实测值相比较。



表

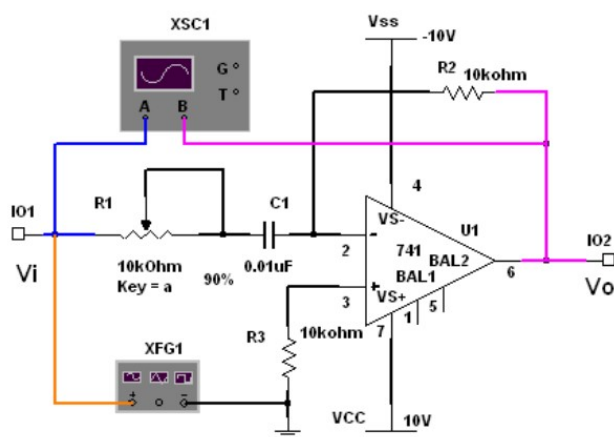
	周期(ms)	脉冲/三角波宽度(ms)	幅度(V_{p-p})	电平(dBm)
方波 V_i				
V_o				
V_o 波形				

5. 微分器

安装右图所示的微分器电路。

1) 消除自激振荡和阻尼振荡

由于电容 C 有隔直流作用，微分器处于深度直流负反馈状态，输出零偏很小，所以一般不用加调零电路。微分器的主要调整工作是消除自激振荡和阻尼振荡。

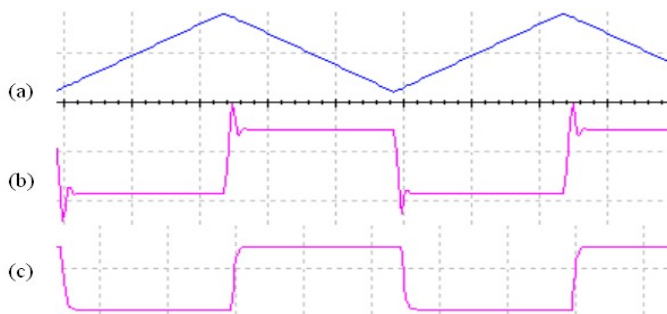


在微分器的输入端加入三角波（图 a），幅度为 5V， $f=1\text{kHz}$ ，用示波器观察微分器的输出波形。此时，若补偿电阻 R_i 不合适，将会看到如图（图 b）出所示的阻尼振荡或大幅度的自激振荡波形。调节 R_i

直到寻到图（图 c）所示的波形，微分器即可正常工作。

2) 输入端加入连续的方波信号， $V_{ip-p}=6V$ ，

$f=1\text{kHz}$ ，用示波器观察并记录输入、输出波形。



	周期(ms)	脉冲宽度(ms)	幅度(V)	电平(dBm)
方波 V_i				
V_o				
V_o 波形				

(二) 设计一个同相交流电压放大器

电压放大倍数为 100

运算放大器 LM324

输入信号 V_{P-P} 值为 $V_{i_{min}}=5\text{mV}$, $V_{i_{max}}=10\text{ mV}$

输入信号频率带宽范围为: $0\sim 4\text{KHz}$;

放大器电路基本要求: 保证输出信号不失真时, 电压放大倍数不小于 50。

借用 EDA 工具软件 Multism2001 设计该电路, 并用计算机进行仿真 (确定电路中个元件的参数值)。

四、实验报告要求

1. 整理测试的数据。
2. 分析、总结实验结果。
3. 通过本次实验有那些收获与建议。

五、预习要求

1. 复习运算放大器工作原理。
2. 阅读 EDA 工具软件 Multism2001 的使用说明

实验五 运算放大器应用（二）

一、实验目的

通过运算放大器在精密检波器、正交振荡器和电压一脉冲宽度调制器中的应用，进一步熟悉运算放大器的特性。

二、概述

1. 精密检波器

用普通二极管作检波器时，由于其正向伏安特性的非线性，因此检波特性不够理想，尤其在小信号的情况下，检波失真相当严重。另外，二极管的正向压降随温度而变，所以这种检波器的特性也与温度有关。

把检波二极管接在运算放大器的反馈回路中，能得到与理想二极管相接近的精密检波器。这种检波器的输出与输入之间即使在小信号情况下仍有良好的线性关系。而且检波器的等效内阻及温度敏感性也比普通检波器好得多。但应注意，由于运算放大器带宽的限制，这种检波器的工作频率不能太高。

精密检波器电路如图所示。当输入电压为负时，运算放大器输出端的电压 V_o' 为正值。因放大器的反相输入端是虚地点，所以二极管 D_1 截止。而 D_2 的工作状态则取决于 V_o' 的大小；当

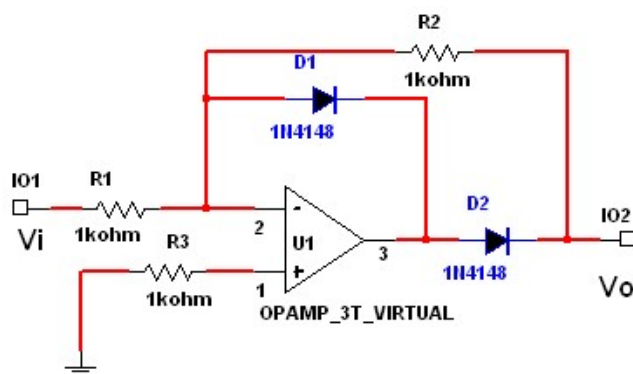
$V_o' < V_f$ 时，(V_f 为二极管的正向压降)， D_2 管截止，放大器处于开环状态；当 $V_o' > V_f$ 时， D_2 导通。 D_2 导通之后，图相当于一个反相比例放大器，它的传输特性为：

$$V_o = -(R_2/R_1) V_i$$

图 精密检波器

由于运算放大器的开环增益 G_{OL} 很高，因此当输入信号 $V_i \geq V_f/G_{OL}$ 时，就能使 D_2 导通。而且 D_2 一旦导通，放大器处于深度闭环状态，失真非常小。因此从小信号开始，该检波器的输出和输入之间就有很好的线性关系。

当输入信号为正时， $V_o' < 0$ ， D_2 截止， D_1 导通。 D_1 导通为放大器提供了深度负反馈，放大器的反相输入端为虚地点，检波器是从虚地点经过 R_2 输出信号，所以



输出为零 ($V_0=0$)。

2. 正交振荡器

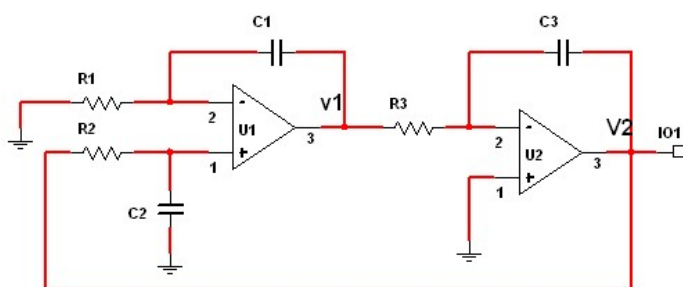
正交振荡器是能够同时产生正弦波和余弦波信号的振荡器，输出信号振幅稳定，失真也不严重。它特别适于作频率固定、失真度要求不高的低频和超低频信号源。

这种振荡器的原理是用运算放大器求解正弦振荡二阶微分方程：

$$\ddot{Y} - \omega_0 Y = 0$$

最后得到正弦和余弦输出波形。

右图是正交振荡器的原理图，其中 U_1 为同相输入积分器， U_2 为反相输入积分器。



由图可以看出，当 $R_1=R_2$ ， $C_1=C_2$ 时：

$$V_1(t) = (1/R_1 C_1) \int V_2(t) dt \quad (1)$$

$$V_2(t) = (1/R_3 C_3) \int V_1(t) dt \quad (2)$$

故有 $d^2 V_2(t) / dt^2 + (1/R_1 C_1 R_3 C_3) V_2(t) = 0$

令 $R_1=R_2=R_3=R$

$$C_1=C_2=C_3=C$$

则上式可写为： $d^2 V_2(t) / dt^2 + \omega_0^2 V_2(t) = 0$

式中 $\omega_0 = 1/RC$

这是标准的正弦振荡微分方程，其解为：

$$V_2(t) = a \sin \omega_0 t$$

系数 a 由初始条件决定。

将上式代入 (1) 式，可求得： $V_1(t) = -a \cos \omega_0 t$

而振荡频率： $f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1/2\pi RC$

由此可见，正交振荡器可同时得到正弦波和余弦波，或者说相位差为 $\pi/2$ 的频率完全相同的正弦波。

3. 脉冲宽度调制器

脉冲宽度调制器是把幅度变化的信号变换为脉冲宽度变化的信号。

下图为脉冲宽度调制器的原理电路图。它由方波振荡器 U_{1A} 、积分器 U_{1B} 和比较器 U_{1C} 三部分电路组成。

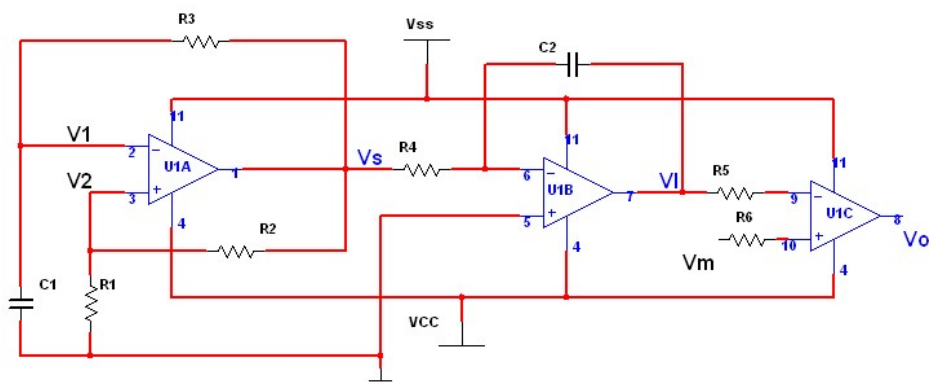


图 脉冲宽度调制器原理电路图

U_{1A} 运算放大器构成固定频率方波振荡器。其中 R_1 、 R_2 组成正反馈电路，给 U_{1A} 运算放大器的同相端提供一个随输出电压而变的基准电压：

$$V_2 = [R_1 / (R_1 + R_2)] V_s$$

其中 V_s 为运算放大器的饱和输出电压。

当输出端为正饱和值 $+V_s'$ 时，

$$V_2 = V_2' = [R_1 / (R_1 + R_2)] V_s'$$

这时电容 C_1 经 R_3 充电，使运放反相输入端的电位逐渐升高。当 $V_1 \geq V_2'$ 时，运放的输出立即跳变为负饱和值 $-V_s''$ 。此时

$$V_2 = V_2'' = -[R_1 / (R_1 + R_2)] V_s''$$

电容 C_1 经 R_3 放电， V_1 下降。当 $V_1 \leq V_2''$ 时，放大器再次跳变至 $+V_s'$ ，如此循环便得到方波输出。

很明显，运算放大器 U_{1A} 在这里起比较器的作用， R_3 、 C_1 构成积分器， R_1 、 R_2 给比较器提供一个基准电压 V_2 ，每当 V_1 、 V_2 交越时，电路就发生翻转，输出方波信

号。

U_{1A} 方波发生器产生的方波信号 V_s ，经 U_{1B} 积分器积分，变为三角波信号 V_i 输出加到比较器 U_{1C} 的反相输入端。在比较器 U_{1C} 的同相输入端加入调制电压信号 V_m 。只要 $|V_m| \leq |V_i|$ ，输出脉冲 V_o 的宽度将与 V_m 成正比。调制器各点的波形如下图所示。

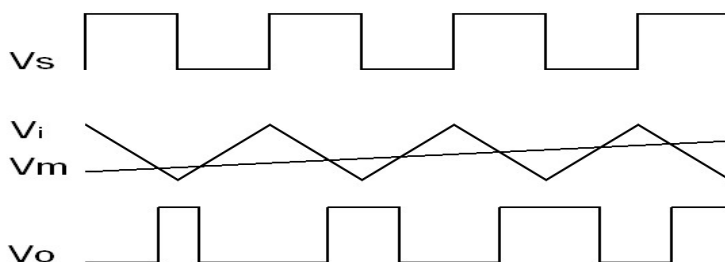
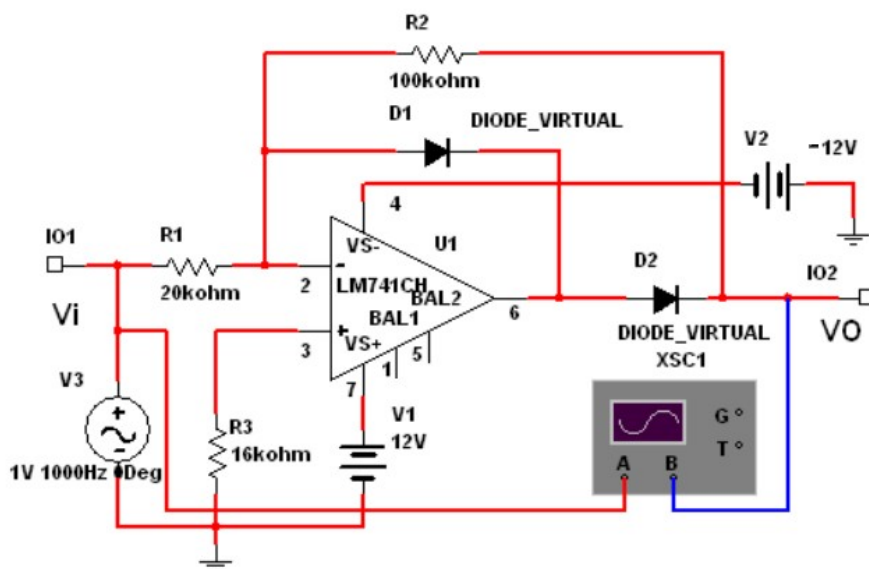


图 脉冲宽度调制器各点的波形图

三、实验内容与要求

1. 精密检波器

安装下图所示的精密检波器电路。



(1) 将输入端对地短路，调节调零电位器 W ，使运算放大器输出端(6 腿)输出为零。

(2) 在输入端加入频率为 1KHz，幅度从 0 到 1 伏（峰峰值）的正弦波信号。用双线示波器观察并记录输入、输出波形。测量其传输特性曲线。

$V_{i\text{-p-p}}$ (mV)	1	10	20	50	100	500	800	1000
$V_{o\text{-p-p}}$ (V)								
V_o 波形								
R_i (kohm)		/	/		/	/	/	

2. 正交振荡器

(1)、器件说明

下面实验内容所用运算放大器器件是四运放集成电路 LM324，它采用 14 脚双列直插（DIP）封装，LM324 的外形、引脚排列如下图：如下图所示：

它内部包含四个形式完全相同运算放大器，除电源共用外，四个运放相互立。

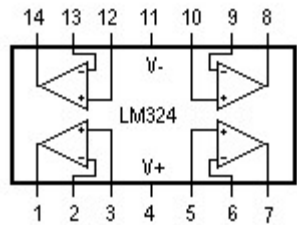


图 1

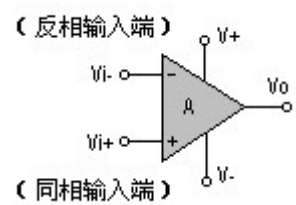


图 2

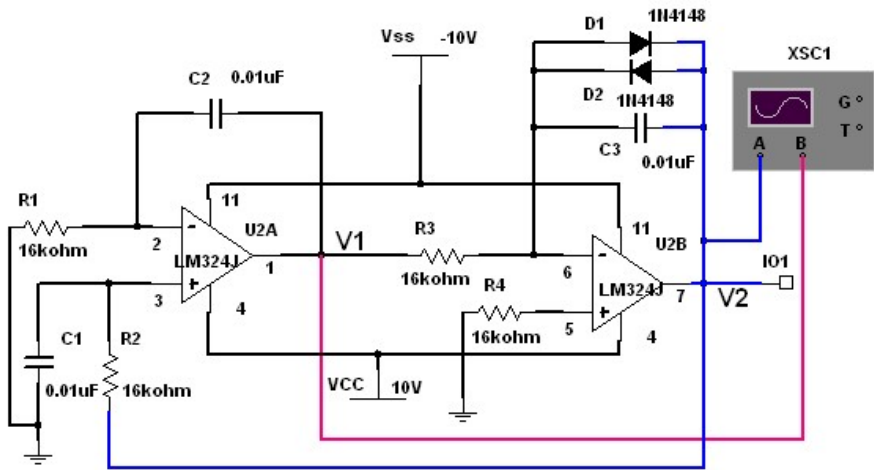
每个运算放大器可以用图 2 所示的符号表示，它有 5 个引出脚其中“+”、“-”分别表示两个信号输入脚，“V+”、“V-”分别表示正、负电源端。两个信号输入端中， $V_i(-)$ 为反相输入端，表示运放输出 V_o 的信号与输入端信号的相位相反； $V_i(+)$ 为同相输入端，表示运放输出 V_o 的信号与输入端信号的相位相同。

由于 LM324 四运放电路具有电压范围宽，静态功耗小，+可用单电源，价格低廉等优点，因此被广泛应用在各种电路中。

(2)、安装电路与测量

安装下图所示的正交振荡器电路。要求产生的正弦波信号幅度（峰峰值）范

围 $5\sim 20V_{pp}$ ，频率为 $800\sim 1000Hz$ ；用示波器观察并记录产生的 V_1 、 V_2 点的波形。测量其相位差、信号幅度和振荡频率。

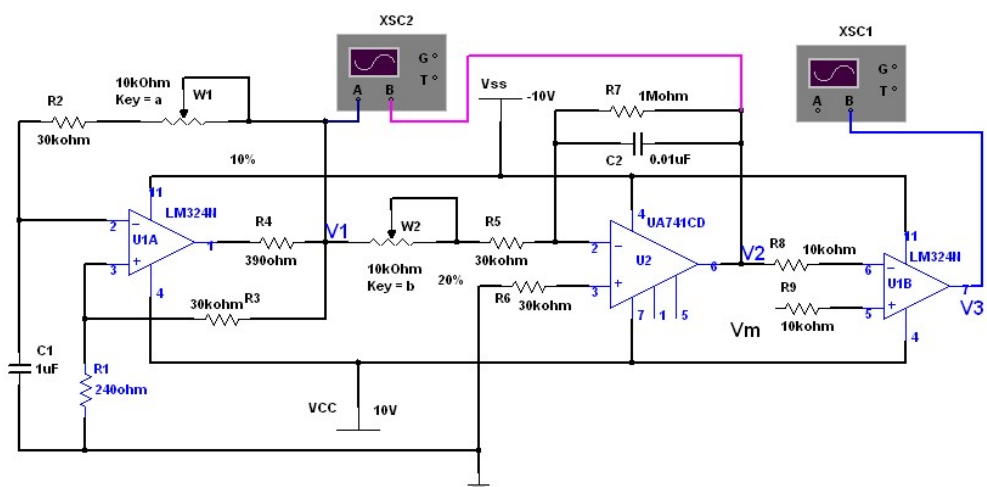


	V_1	V_2
幅度 (V)		
频率 (Hz)		
相位差		

3. 脉冲宽度调制器

安装下图所示的脉冲宽度调制器电路。

- (1) 断开积分器 U_2 和方波发生器 U_{1A} 的连接线，将积分器输入端对地短路，短路积分电容 C_2 ，调节积分器的调零电位器 W_3 使积分器输出为零。
- (2) 调节电位器 W_1 ，使方波发生器 U_{1A} 产生频率为 $1kHz$ ， $\pm 6V$ 的方波信号。
- (3) 接通方波发生器 U_{1A} 和积分器 U_2 ，调节电位器 W_2 ，使积分器输出幅值为 $-5V\sim +5V$ 的三角波。
- (4) 在调制信号输入端 V_m 加入直流调制电压，用示波器观察并记录 V_1 、 V_2 和 V_3 的波形。



(5) 改变 V_m 改变值测量 V_3 输出端对应的正脉冲宽度 τ 填入下表:

V_m	-5V	-3V	-1V	0V	1V	3V	5V
τ							

(二) 设计一个三角波发生器

运算放大器为: LM324

电源电压 $\pm 10V$

三角波周期要求 $T=2ms$, 幅度值 $\pm 6V$

借用 EDA 工具软件 Multism2001 设计该电路, 并用计算机进行仿真 (确定电路中个元件的参数值)。

四、实验报告与要求

1. 整理实验数据, 并分析实验结果的正确性。
2. 撰写实验总结和心得体会。
3. 对实验有何建议。

