



哈尔滨工业大学 (深圳)

模拟电子技术实验指导书

编者：潘学伟、吴屏

2019 年

要求：每个实验按“实验指导书”要求做实验。实验前，请预习，完成实验报告的预习部分，实验后，整理数据，完成实验报告的其他部分

哈尔滨工业大学（深圳）

实验与创新实践教育中心

学生实验守则

实验时应保证人身安全，设备安全，爱护国家财产，培养科学作风。为此，在本实验室应遵守以下守则：

1. 学生必须按时到指定实验室做实验，不得迟到。
2. 上课前学生必须对所做的实验进行充分预习，并写出预习报告，经指导教师检查合格后，方可进行实验。
3. 学生应独立完成实验准备工作。在启动设备之前，需经指导教师检查认可。
4. 实验时，要严肃认真，正确操作，仔细观察，真实记录实验数据的结果。不许喧闹谈笑，不做与实验无关的事情，不动与实验无关的设备，不进入实验无关的场所。
5. 实验中要注意安排，遵守实验室安全规定及有关操作规程。
6. 仪器设备发生不正常现象时，应及时报告指导教师。发生人身安全事故时，应立即切断相应的电源、气源等，并听从指导教师的指导，要沉着冷静，不要惊慌失措。
7. 实验中，如发现仪器设备损坏，应及时报告，查明原因。凡属违反操作规程导致设备损坏的，要追究责任，照章赔偿。
8. 学生要进入开放实验室做自行设计的实验时，应事先和有关实验室联系，报告自己的实验目的、内容，并整理好实验现场后，方可离去。
9. 实验做完后，需先经指导教师审查数据并签字，然后再将仪器设备按原样整理完毕，清理实验室。在得到教师允许后方可离去。
10. 学生必须认真做好实验报告，在规定的时间内交给教师批阅。批阅后的实验报告由学生妥善保管，以备考核。

实验设备使用注意事项

1. 必须在断电情况下完成实验电路的连接，经检查确认无误后方可上电。
2. 使用直流稳压电源两个通道分别输出为正负电源时，正电源的负端和负电源的正端要连在一起。
3. 若发现设备打开无显示，请检查设备电源是否插好或保险丝是否良好。
4. 可调电阻（电位器）在使用时，须先调至最大值，然后再通电，最后调至需要的阻值。
5. 若发现上电后，芯片发热严重或者供电电源的电源异常增加，应及时断电，检查芯片是否损坏，检查电路连接是否正确。
6. 使用电流表时请注意将电流表调至最大档位串联于电路中，再逐个调节档位，避免烧坏仪表。且切勿将电流表并联于电路，以免造成电源短路。
7. 示波器两个测试探头的地端是接在一起的，所以测试时需要接在电路的同一个“地”的电位点。
8. 函数发生器的输出的黑色端和发生器的地是在内部接在一起的，所以在测试时，函数发生器的黑色端、示波器探头的地端都应该接在电路的“地”的同一点。

实验课安全知识须知

1. 须知 1：规范着装。为保证实验操作过程安全、避免实验过程中意外发生，学生禁止穿拖鞋进入实验室，女生尽量避免穿裙子参加实验。
2. 须知 2：实验前必须熟悉实验设备参数、掌握设备的技术性能以及操作规程。
3. 须知 3：实验时人体不可接触带电线路，接线或拆线都必须在切断电源的情况下进行。
4. 须知 4：学生独立完成接线或改接线路后必须经指导教师检查和允许，并使组内其他同学引起注意后方可接通电源。实验中如设备发生故障，应立即切断电源，经查清问题和妥善处理故障后，才能继续进行实验。
5. 须知 5：接通电源前应先检查功率表及电流表的电流量程是否符合要求，有否短路回路存在，以免损坏仪表或电源。

特别提醒：实验过程中违反以上任一须知，需再次进行预习后方可再来参加实验；课程中违反三次及以上，直接重修。

实验报告撰写要求

1. 要求 1：预习报告要求：预习列出该次实验的实验目的、原理以及使用的设备，器件等；绘制实验线路图，并注明仪表量程、电阻器阻值、电源端编号等；理论计算实验要求的数据，并注明相关的实验环境参数与要求；如有要求需要仿真预习的，根据每个实验的要求进行仿真，需要有仿真原理图，仿真参数，仿真结果等。
2. 要求 2：实验完成后：实验报告中对实验过程进行描述，对实验数据进行分析 and 整理，说明实验结果与理论是否符合，与预习结果对比是否符合；回答实验指导书中的问答题、思考题；另一方面根据实测数据和在实验中观察和发现的问题，经过自己研究或分析讨论后写出的心得体会。
3. 要求 3：在数据处理中，曲线的绘制必须用坐标纸画出曲线，曲线要用曲线尺或曲线板连成光滑曲线，不在曲线上的点仍按实际数据标出其具体坐标。要求在同一坐标系下画的不同曲线，需要用不同的线型或者符号标明。
4. 要求 4：本课程实验结束后，请班长按照序号排序，并在课程结束后按要求上交实验报告。

温馨提示：实验报告撰写过程中如遇预留空白不足，请在该页背面空白接续。

目录

实验一二极管和三极管的功能测试	1
1.1 实验目的	1
1.2 实验预习要求	1
1.3 实验仪器与器件	1
1.4 实验原理	1
(1) 管型和基极 B 的判断	2
(2) 发射极 E 和集电极 C 的判别	2
1.5 实验步骤	4
1.6 注意事项	5
1.7 故障分析与检查排除	6
1.8 实验思考题	6
1.9 实验报告要求	6
实验二单管交流放大电路	7
2.1 实验目的	7
2.2 实验预习要求	7
2.3 实验仪器与器件	7
2.4 实验原理	7
2.5 实验步骤	8
2.6 注意事项	11
2.7 故障分析与检查排除	11
2.8 实验思考题	11
2.9 实验报告要求	11
实验三射极跟随器	12
3.1 实验目的	12
3.2 实验预习要求	12
3.3 实验仪器与器件	12
3.4 实验原理	12
3.5 实验步骤	14
3.6 注意事项	15
3.7 故障分析与检查排除	16
3.8 实验思考题	16
实验四带负反馈的两级交流电压放大电路	17
4.1 实验目的	17
4.2 实验预习要求	17
4.3 实验仪器与器件	17
4.4 实验原理	17
4.5 实验步骤	19
4.6 注意事项	21
4.7 故障分析与检查排除	21

4.8 实验思考题	22
4.9 实验报告要求	22
实验五有源滤波电路的研究	23
5.1 实验目的	23
5.2 实验预习要求	23
5.3 实验仪器与器件	23
5.4 实验原理	23
5.5 实验步骤	27
5.6 实验思考题	32
5.7 实验报告要求	32
实验六集成运放的线性和非线性应用	33
6.1 实验目的	33
6.2 实验预习要求	33
6.3 实验仪器与器件	33
6.4 实验原理	33
6.5 实验步骤	37
6.6 实验注意事项	42
6.7 故障分析与检查排除	42
6.8 实验思考题	42
实验七波形发生电路	43
7.1 实验目的	43
7.2 实验预习要求	43
7.3 实验仪器与器件	43
7.4 实验原理	43
7.5 实验步骤	45
7.6 实验注意事项	48
7.7 故障分析与检查排除	48
7.8 实验思考题	48
实验八直流稳压电路	49
8.1 实验目的	49
8.2 实验预习要求	49
8.3 实验仪器与器件	49
8.4 实验原理	49
8.5 实验步骤	51
8.6 实验注意事项	54
8.7 故障分析与检查排除	55
8.8 实验思考题	55
实验九集成功率放大器电路	56
9.1 实验目的	56
9.2 实验预习要求	56

9.3 实验仪器与器件	56
9.4 实验原理	56
9.5 实验步骤	58
9.6 实验注意事项	60
9.7 故障分析与检查排除	60
9.8 实验思考题	60

实验一 二极管和三极管的功能测试

1.1 实验目的

- 1.掌握基本实验仪器的使用，对万用表、信号发生器应能较熟练的使用。
- 2.学习二极管和三极管功能的测试方法，并判别晶体管的工作状态。
- 3.学习三极管的输入特性和输出特性的测量方法。

1.2 实验预习要求

- 1.复习二极管和三极管的工作原理及其在不同工作状态下的特性。
- 2.实验之前必须明确本次试验的目的、意义、实验原理，实验电路图。

1.3 实验仪器与器件

表 1-1 实验仪器与器件列表

	名称	数量	型号
1	直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	2 台	Fluke F287C、Fluke 17B+
3	直流微安表（指针式）	1 台	0~100μA
4	电阻	4 只	220Ω×1 25kΩ×1 330kΩ×2
5	电位器	3 只	1kΩ×1 2.2kΩ×1 220kΩ×1
6	二极管	1 只	1N4007×1
7	三极管	2 只	9013×1, 9012×1
8	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
9	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

1.4 实验原理

二极管是一种具有两个电极的半导体器件，由于其具有单向导电的性质，广泛应用于各种电子电路中。三极管，全称应为半导体三极管，也称双极型晶体管、晶体三极管，是一种控制电流的半导体器件，其作用是把微弱信号放大成幅度值较大的电信号，也用作无触点开关。

1.4.1 判断二极管极性

用万用表测量二极管时，它的等效电路如图 1-1 所示，图中 R_0 为表内等效电阻， U_0 为表内电源电压。将万用表旋转至二极管的测量端，若将红色表笔接到二极管的阳极，黑色表笔接到二极管的阴极，则二极管正向偏置，呈现低阻，显示屏会显示二极管的管压降，硅管为 0.6~0.7V 左右，锗管为 0.3~0.5V 左右。反

之，将红色表笔接到二极管的阴极，黑色表笔接到二极管的阳极，则二极管反偏呈高阻状态，显示屏会显示 O.L。这样就可以判别二极管的极性。

也可以用万用表的电阻测试端测试，来判别二极管的极性。将万用表旋转至电阻的测量端，若将红色表笔接到二极管的阳极，黑色表笔接到二极管的阴极，则二极管正向偏置，呈现低阻，显示屏会显示二极管的电阻值，不同的二极管，阻值不同，阻值在几 Ω 到几 $k\Omega$ ，可以使用万用表 F287C 的 Range 按钮，选择合适的电阻档位测试二极管的正向电阻值。反之，将红色表笔接到二极管的阴极，黑色表笔接到二极管的阳极，则二极管反偏呈高阻状态，显示屏会显示 O.L。这样就可以判别二极管的极性。

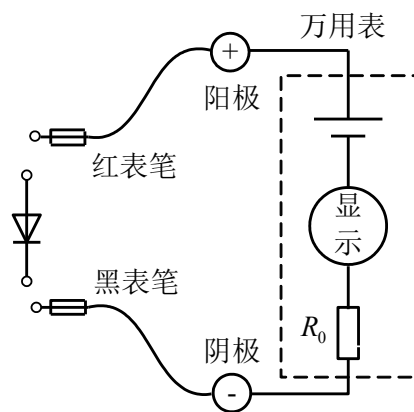


图 1-1 二极管极性判别等效电路

1.4.2 晶体三极管管脚的判别

(1) 管型和基极 B 的判断

在对晶体管进行测量时，可以把晶体三极管的结构看做是两个背靠背的二极管，如图 1-2 所示，对 NPN 管来说，基极是两个二极管的公共阳极；对 PNP 来说，基极是两个二极管的公共阴极，因此，判别基极是公共阳极还是公共阴极，即可知该管是 PNP 型还是 NPN 型。

(2) 发射极 E 和集电极 C 的判别

在图 1-3 中，将已知的三极管 B 极接到 N_0 端，另外两个极任意接到 N_1 和 N_2 两端。

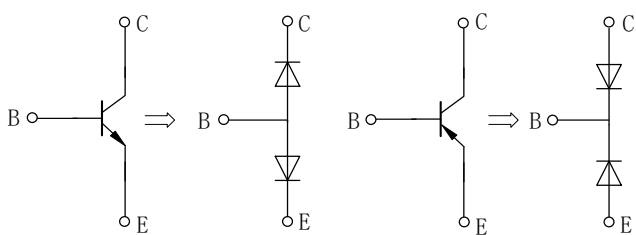


图 1-2 三极管的二极管等效示意图

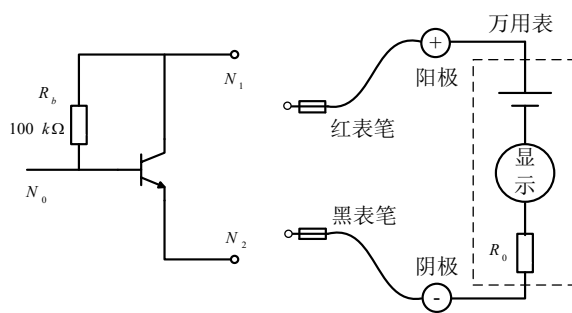


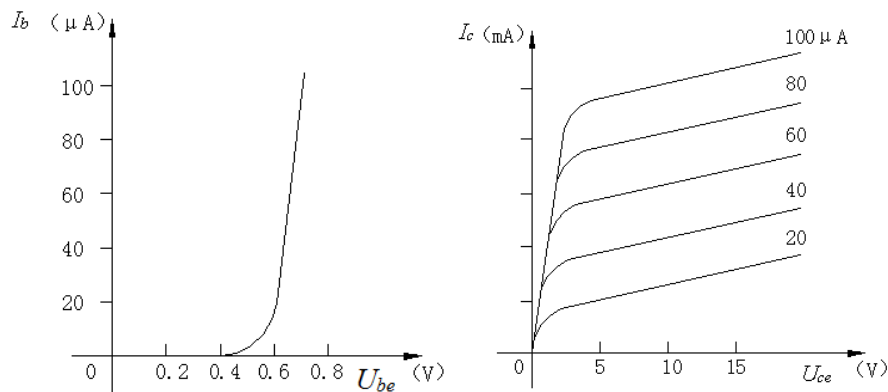
图 1-3 三极管判别示意图

如果用万用表电阻测试端，将红表笔接 N_1 端，黑表笔接于 N_2 端，则测得的电阻小说明电流大，即 I_C 大。

如果红、黑表棒互换，则测得的电阻大 (I_C 小)。可见， N_1 端是集电极 C、 N_2 端是发射极 E。

用两只手分别捏住 B、C 两极(但不要使 B、C 两脚相碰上)，人体亦可代替图 1-3 中 $R_b(100k\Omega)$ 的作用。

同一型号的晶体管由于分散性其参数差异很大，因此，在使用晶体管前需要测试它的特性，晶体管的特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线，输入特性曲线是指参变量 $U_{CE}=\text{常数}$ 时， $I_B=f(U_{BE})$ 的关系曲线；输出特性曲线是指参变量 $I_B=\text{常数}$ 时， $I_C=f(U_{CE})$ 关系曲线。对应不同的参变量，可得一族曲线，图 1-4 就是某个晶体管的特性曲线，从特性曲线上可以求得管子的 β ， I_{CEO} 的参数，上述特性曲线可以用逐点测试法测得。



(a) 输入特性 (b) 输出特性

图 1-4 三极管的特性曲线图

逐点测试法的测试电路如图 1-5 所示。图中 R_{W1} 用于调节基极电流 I_B ， R_{W2} 用于调节集电极电压 U_{CE0} ，测试输入特性时， R_{W2} 用做调节参变量 U_{CE} ，并在测试过程中保持 U_{CE} =正常数。测试输出特性时， R_{W1} 用做调节参变量 I_B ，逐点测试，每给定一个参变量可测得一条特性曲线，为了获得一族特性曲线，需调节一系列 I_B 进行多次测量。

在放大电路中，必须设置静态工作点，图 1-6 为固定偏置电路，调节偏置电阻 R_b ，可以调节静态工作点。

晶体管的直流(静态)工作状态可以用万用表检测。当管子处于截止区时， $U_{CE}=U_{CC}$ ；管子处于饱和区时，集电极正偏 $U_{CE}<U_{BE}$ ；在实际工作中，常用上述方法来判别放大电路是否正常工作。实验原理图如图 1-7 所示。

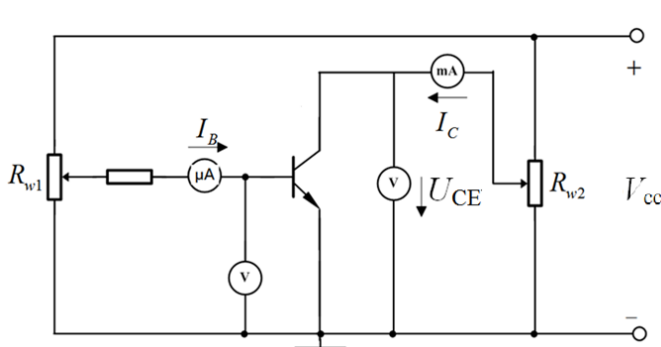


图 1-5 测试电路图

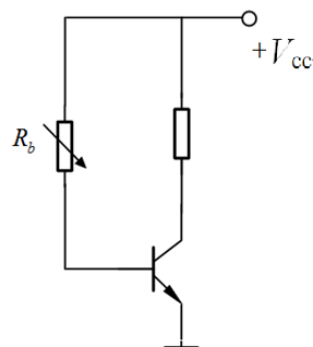


图 1-6 固定偏置电路

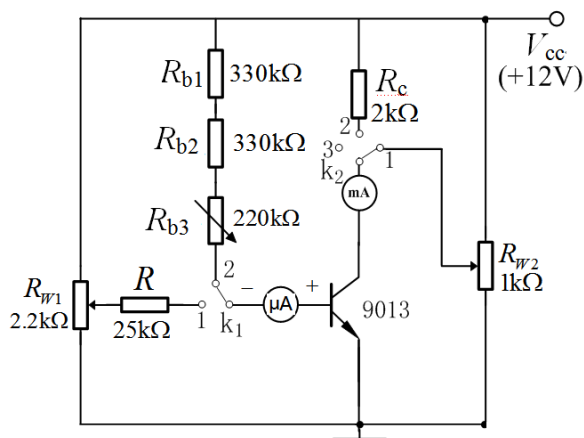


图 1-7 实验原理图

1.5 实验步骤

1. 二极管判别

用万用表判别二极管 1N4007 的阳极和阴极，并分别用 $500\text{k}\Omega$ 和 $5\text{M}\Omega$ 的档位测量一个二极管的正、反向电阻，分别记录数据于表 1-2 中。

表 1-2 二极管判别记录表格

二极管极性判别	电压值	二极管电阻测量	电阻	二极管电阻测量	电阻
二极管正向电压		二极管正向电阻 ($500\text{k}\Omega$ 档位)		二极管正向电阻 ($5\text{M}\Omega$ 档位)	
二极管反向电压		二极管反向电阻 ($500\text{k}\Omega$ 档位)		二极管反向电阻 ($5\text{M}\Omega$ 档位)	

2. 晶体管的管型判别

用万用表的二极管测试端判别晶体管 9013 和 9012 的管型，并将测试结果填入表 1-3 中，

用万用表的二极管测试端判别晶体管 9013 和 9012 的管型，并将测试数据，电压值记录数据于表 1-3 中，对比两次测试的结果。

表 1-3 晶体管管型判别记录表格

晶体管极性判别	U_{BE}	U_{BC}	U_{CE}	U_{EB}	U_{CB}	U_{EC}	管型
9012							
9013							

3. 测量晶体管输入特性

使用三极管 9013，按图 1-8 接线，使参变量 $U_{CE}=0$ ；调节 R_{W1} 改变 U_{BE} ，使 I_B 如表 1-4 所列之值。读出相应的 U_{BE} 值，并做出 $I_B=f(U_{BE})|_{U_{CE}=0}$ 特性曲线，并分析数据。

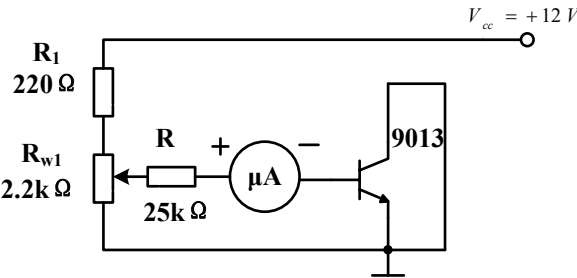


图 1-8 晶体管输入特性测试电路图 1

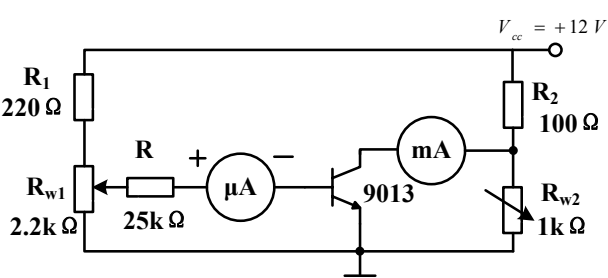


图 1-9 晶体管输入特性测试电路图 2

按图 1-9 接线，其中 mA 表为 F287C 的 mA 电流档（注意 mA 档不能超过 400mA），也可为台式万用表的电流测试档（量程为 3A 的电流档）， μA 表为指针式电流表，调节 R_{W2} ，使参变量 $U_{CE}=2\text{V}$ ，并保持 U_{CE} 值不变；调节 R_{W1} 重复上述步骤，并做出 $I_B=f(U_{BE})|_{U_{CE}=2\text{V}}$ 的输入特性曲线，并分析数据。

注意事项：使用万用表电流档测试时，要注意电流表需串联到电路中，万用表的接线孔使用电流接线孔，并且档位扭转到相应的档位，检查后方可接通电源。

表 1-4 晶体管的输入特性测试表格

$I_B(\mu A)$ $U_{BE}(V)$ 测试条件	0	2	4	6	10	20	40	60	80
$U_{CE}=0$									
$U_{CE}=2V$									

4. 测量晶体管输出特性

按图 1-9 接线，先置滑动变阻器为中间阻值，调节 R_{W1} 使参变量 I_B 分别为 $10\mu A$ 、 $20\mu A$ 、 $30\mu A$ ，调节 R_{W2} 使 U_{CE} 如表 1-5 所列之值，在同一个坐标系下，分别做出三条 $I_C=f(U_{CE})|I_B=\text{常数}$ 的特性曲线，并分析数据。

表 1-5 晶体管的输出特性曲线测试数据

$U_{CE}(V)$ $I_C(mA)$ 测试条件	0	1	2	3	5	10
$I_B=10\mu A$						
$I_B=20\mu A$						
$I_B=30\mu A$						

5. 观察晶体管的三种工作状态

按图 1-10 接线，先将 R_{b3} 调节到最小，调节 R_{W1} ，使得三极管工作于临界饱和状态，并读取此时集电极电流 I_{CS} (参考值: $I_{CS} < U_{CC}/R_C = 4mA$) 和相应的基极电流 I_{BS} 。再调节 R_{b3} ，微调 R_{W1} ，观察 I_B 与 I_C 的关系，分别在 $I_B > I_{BS}$ ， $I_B = 0 \sim I_{BS}$ ， $I_B = 0$ (参考数据为 $I_B = 20\mu A$ ， $10\mu A$ 及将微安表断开) 时，测量晶体管在放大、截止、饱和，三种状态下的静态工作点，记录于 1-6 的表格中。

判断晶体管两个结的偏置状态及工作区域。并求出工作于放大区时， $\beta =$ _____

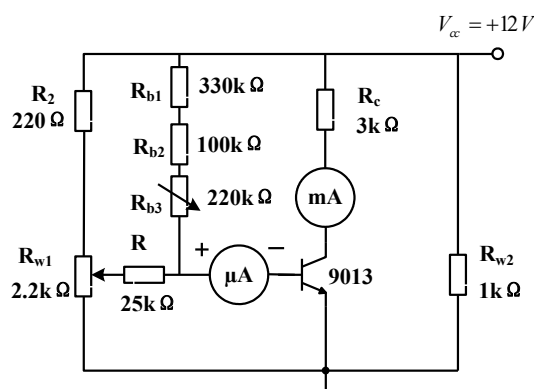


图 1-10 测试晶体管三种工作状态电路图

表 1-6 晶体管的三种工作状态特性测试表格

测试条件	I_B	$U_{CE}(V)$	$U_{BE}(V)$	I_C	晶体管的工作区域	晶体管的两个结的偏置状态
$I_B > I_{BS}$						
$I_B = 0 \sim I_{BS}$						
$I_B = 0$	0					

1.6 注意事项

- (1) 使用万用表测试电流时，万用表使用电流档位，并且串联入电路，接入插孔也为电流接入孔。
- (2) 滑动变阻器的滑动端和固定端不能接错，为避免损坏，上电前将滑动变阻器滑动端滑到中间位置。

-
- (3) 实验过程中不允许带电换线、换元件，每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
 - (4) 在电路工作中，如果发现晶体管发出异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

1.7 故障分析与检查排除

(1) 实验中常见故障

- ①连线：连线错，接触不良，断路或短路；
- ②元件：元件错或元件值错，包括电源输出端接错；
- ③参考点：电源、实验电路、测试仪器之间公共参考点连接错误等等。

(2) 故障检查

故障检查方法很多，一般是根据故障类型，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点并给予排除。简单实用的方法是用万用表（电压档或电阻档）在通电或断电状态下检查电路故障。

①断电检查法：用万用表的电阻档，在断开电源情况下，根据实验原理，测短路情况：电路某两点应该导通无电阻，电阻档显示电阻为零，即为短路；测开路情况，某两点应该开路，即电阻档显示为无穷大或电阻很大，即为开路。若测得的结果不是这样，则故障即在此两点之间。

②通电检查法：用万用表的电压档（或电压表），在接通电源情况下，根据实验原理，测量电路某两点之间是否有电压，若某两点之间应该有电压，万用表测不出电压；若某两点不应该有电压，而万用表测出了电压，则故障即在此两点之间。

1.8 实验思考题

- 1. 根据表 1-5 的数据，取 $U_{CE}=5V$ 时的实验数据，求晶体管的 β 值。
- 2. 由实验步骤 4 和所得结果，总结晶体管 3 个工作区域的特征，如何根据 U_{CE} 值判断晶体管的工作状态？

1.9 实验报告要求

- 1. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，波形必须手写、手画，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
- 2. 实验思考题需要写在实验报告中。
- 3. 实验体会、意见和建议写在实验结论之后。

实验二单管交流放大电路

2.1 实验目的

1. 掌握单管交流电压放大电路的放大原理，掌握放大电路静态工作点的调试方法。
2. 了解静态工作点的改变对放大电路性能的影响。
3. 观察饱和失真和截止失真对放大电路输出电压波形的影响。
4. 进一步熟悉示波器、低频信号发生器、直流稳压电源及万用表的使用。

2.2 实验预习要求

1. 复习共发射极交流电压放大电路的组成、放大原理和指标计算方法。
2. 实验之前必须明确本次实验的目的、意义，实验原理，实验电路图。
3. 考虑若提高电压放大倍数 A_u ，应采取哪些措施？

2.3 实验仪器与器件

表 2-1 实验仪器与器件列表

	名称	数量	型号
1	直流稳压电源	1 台	DP832A
2	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
3	示波器	1 台	Tek MSO2012B
4	手持万用表	2 台	Fluke F287C、Fluke 17B+
5	三极管（NPN）	1 只	9013×1
6	电阻	若干	1kΩ×2、2.4kΩ×1、20kΩ×2、100kΩ×1、
7	可调电阻器	2 只	100 kΩ×1、220kΩ×1、
8	电容	2 只	10μF/15V×2、47μF/35V×1
9	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
10	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

2.4 实验原理

单管交流电压放大电路的最典型电路是共发射极分压偏置式交流电压放大电路，电路如图 2-1 所示。

在图 2-1 中，晶体管为非线性元件，要使放大器不产生非线性失真，就必须建立一个合适的静态工作点，使晶体管工作在放大区。若 Q 点过低（ I_B 小，则 I_C 小， U_{CE} 大），晶体管进入截止区，产生截止失真（如图 2-2b）； Q 点过高（ I_B 、 I_C 大， U_{CE} 小），晶体管将进入饱和区，产生饱和失真（如图 2-2a）。调节基极电阻（电位器） R_p 即可调整静态工作点。

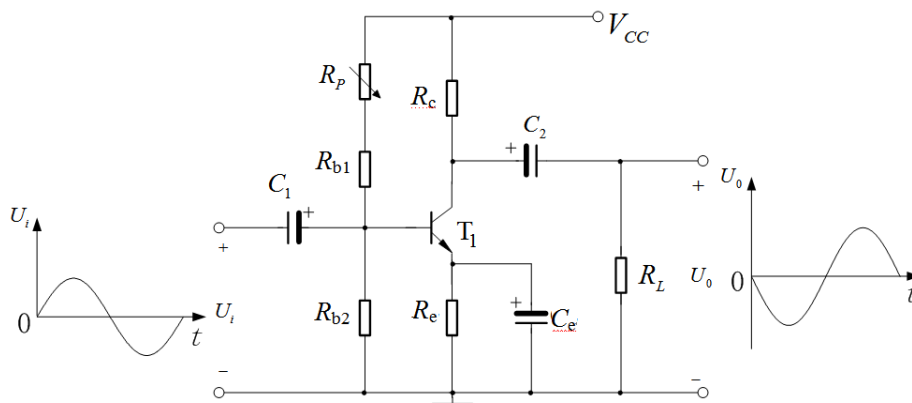


图 2-1 分压偏置式共发射极交流电压放大电路

图 2-1 中的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} \quad (2-1)$$

测量电压放大倍数应保证静态工作点在最佳位置，输出电压波形幅度最高且不失真的前提下进行。

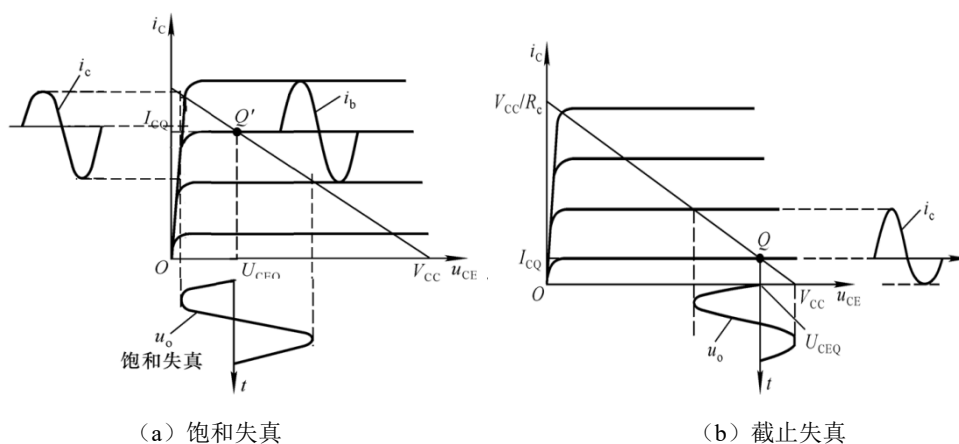


图 2-2 共发射极交流电压放大电路，静态工作点不同造成的饱和失真和截止失真外特性图

2.5 实验步骤

本次实验研究的是交流放大电路，所以输入信号和输出信号都是交流，在用示波器观测信号时，需要用 AC 耦合来提取出信号的交流分量来测量分析。

在实验前，需用万用表的二极管测试端，测试实验使用的三极管是否正常，如果正常才能进行下面实验接线。

用万用表测试时，不使用表笔，使用香蕉头的导线，减小接触电阻。

1. 调整静态工作点

实验电路按图 2-3 接线 $V_{CC} = 12V$ 。

设输入信号 U_i 为正弦信号，其有效值 $U_i = 10mV$ ，频率 $f = 1kHz$ 。此信号从信号发生器取出，用交流毫伏表或者万用表交流 mV 档监测。

直流电压 12V 从直流稳压电源中取出，用万用表的直流电压档监测。按以下步骤调整静态工作点：

第一步，将输入信号 $U_i = 10mV$ 接入电路中，将直流电压 12V 接入电路中。检查电路无误后，接通电源。

第二步，按图 2-3 所示接入示波器，通道 CH1 接放大电路的输入端，通道 CH2 接放大电路的输出端。
注意：示波器和直流稳压电源、信号源要共地。

第三步，调节电位器 R_p ，用示波器观察放大电路的输出电压波形，经过一段时间，等待输出电压稳定以后，采用示波器的 AC 耦合，用 **measure** 测试输出电压交流分量的峰峰值或者幅值，当输出电压幅值达到最大且波形不失真时，此时静态工作点位置最佳，即工作点已经调好。

第四步，工作点调好之后，断开信号源接线，用万用表的直流电压挡分别测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 、 V_C 、 V_E ，用电阻档测试电阻实际值 R_c 、 R_e ，并计算 I_B 、 I_C 和 β 的数值，将相关数据计入表 2-2 中。

表 2-2 静态工作点数据

实测数据						根据实测计算的数据			
U_{BE}/V	U_{CE}/V	V_B/V	V_E/V	V_C/V	$R_c/k\Omega$	$R_e/k\Omega$	$I_B/\mu A$	I_C/mA	β

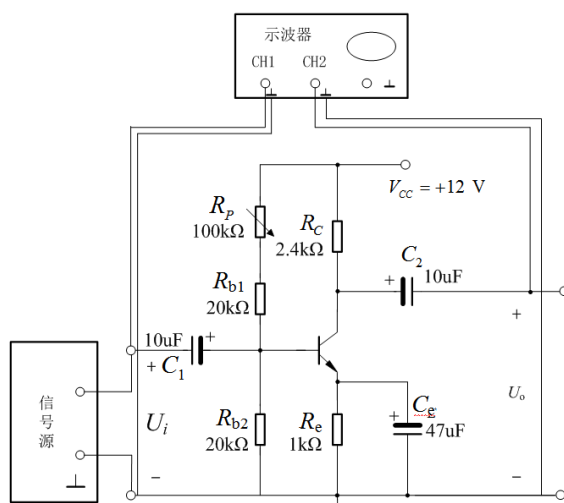


图 2-3 实验电路接线图

2. C_e 的影响

在图 2-3 中，当静态工作点测量完毕之后，保持静态工作点不变（ R_p 不变），接通信号发生器。保持输入正弦信号电压有效值 $U_i=10mV$ ，频率 $f=1kHz$ 不变（万用表交流 **mV** 档监测）。用万用表交流 **mV** 档测量输入电压 U_i ，用交流电压档测量 C_e 变化时的输出电压 U_o ，计算电压放大倍数填入表 2-3 中。

在改变 C_e 时，需要断开信号源和直流稳压电源。

说明 C_e 对放大倍数的影响。

用示波器的 AC 耦合，观察输入电压和输出电压的波形，在同一时序下记录 u_i 和 u_o 波形，并思考推导说明 C_e 变化对输出波形影响的原因。

表 2-3 C_e 对放大倍数的影响

条件	$U_i(mV)$	$U_o(V)$	A_u	u_i 和 u_o 波形
$C_e=47\mu F$				
C_e 断开				

3. 测量电压放大倍数

在图 2-3 中，保持静态工作点不变， $C_e=47\mu F$ ，接通信号发生器。保持输入正弦信号电压有效值 $U_i=10mV$ ，频率 $f=1kHz$ 不变（万用表交流 **mV** 档监测）。分别用万用表交流电压档测量负载开路和有载情况下的输出电压有效值 U_o ，计算交流电压放大倍数填入表 2-4 中，并推导分析负载变化对交流电压放大倍数的影响原因。

表 2-4 测量交流电压放大倍数

条件	$U_i(\text{mV})$	$U_o(\text{V})$	A_u
$R_L = \infty$ (R_P 不变)			
$R_L = 10\text{k}\Omega$ (R_P 不变)			
$R_L = 1\text{k}\Omega$ (R_P 不变)			

4. 观测静态工作点对输出电压波形的影响

实验电路按图 2-3 接线，负载开路。按以下步骤调整静态工作点，测量数据填入表 2-5 中。

(1) 静态工作点合适的情况

按照 1.节的步骤，调节 R_P ，使静态工作点在最佳位置时，观察输入和输出电压波形，画在表 2-5 中。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 、 V_C 的电压值，使用 2.中测得的 R_c 、 R_e 实际值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 2-5 中。

(2) 饱和失真的情况

将 R_P 的阻值逐渐调小，输入信号保持不变，观察输入和输出电压波形，使波形出现饱和失真，在表 2-5 中画出输出电压波形。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 、 V_C 的电压值，使用 2.中测得的 R_c 、 R_e 实际值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 2-5 中。

(3) 截止失真的情况

首先断开直流电源，更换两个电阻，即 $R_{b1}=100\text{k}\Omega$ ， $R_P=220\text{k}\Omega$ 可调电阻，按照 1.节的步骤，调节 R_P ，将 R_P 的阻值逐渐调大，直至最大，输入信号保持不变，观察输出电压波形，使波形出现截止失真，在表 2-5 中画出输出电压波形。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 、 V_C 的电压值，使用 2.中测得的 R_c 、 R_e 实际值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 2-5 中。

(4) 输入信号增大情况

首先断电更换两个电路元件， $R_{b1}=20\text{k}\Omega$ ， $R_P=100\text{k}\Omega$ 可调电阻，按照 1.节的步骤，输入信号 $U_i=10\text{mV}$ ，频率 $f=1\text{kHz}$ ，调节 R_P ，使之达到最佳静态工作点。然后逐渐增大 U_i ，注意 $U_i<30\text{mV}$ ，观察输出电压波形，使输出电压波形同时出现饱和失真与截止失真，在表 2-5 中画出输出电压波形。然后断开信号源，用万用表直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 、 V_C 的电压值，使用 2.中测得的 R_c 、 R_e 实际值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 2-5 中。

表 2-5 静态工作点对输出电压波形的影响

		R_P 合适 $U_i=10\text{mV}$	R_P 减小 $U_i=10\text{mV}$	R_P 最大 $U_i=10\text{mV}$	R_P 合适 U_i 偏大
Q 点	测量参数/V	$U_{CE}=\quad$	$U_{CE}=\quad$	$U_{CE}=\quad$	$U_{CE}=\quad$
		$U_{BE}=\quad$	$U_{BE}=\quad$	$U_{BE}=\quad$	$U_{BE}=\quad$
		$V_B=\quad$	$V_B=\quad$	$V_B=\quad$	$V_B=\quad$
		$V_C=\quad$	$V_C=\quad$	$V_C=\quad$	$V_C=\quad$
	计算静态值	$I_B=\quad \mu\text{A}$	$I_B=\quad \mu\text{A}$	$I_B=\quad \mu\text{A}$	$I_B=\quad \mu\text{A}$
		$I_C=\quad \text{mA}$	$I_C=\quad \text{mA}$	$I_C=\quad \text{mA}$	$I_C=\quad \text{mA}$

画输入和输出电压波形				
失真判断				

2.6 注意事项

- (1) 若仅需要观测交流信号，示波器采用 AC 耦合方式。
- (2) 用万用表调好信号源的输出电压 10mV，信号源才能接入电路。
- (3) 万用表测试时，不使用表笔，使用香蕉头的导线，减小接触电阻。
- (4) 实验中，要将直流稳压电源、函数信号发生器、示波器等电子仪器和实验电路共地，以免引起干扰。
- (5) 实验过程中不允许带电换线、换元件，每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
- (6) 在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

2.7 故障分析与检查排除

参考实验一 1.7。

2.8 实验思考题

1. 输入信号合适的情况下，晶体管放大电路出现饱和失真或截止失真的原因是什么？在电路中应调整哪个元件才能消除失真？
2. 在此次使用的放大电路中，如何提高交流电压放大倍数？
3. 总结失真类型的判断方法，说明本实验中的放大电路的输出出现削顶失真时，为截止失真，还是饱和失真？这一结论适用于由 PNP 型管构成的共射级放大电路吗？请说明理由。

2.9 实验报告要求

1. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，波形必须手写、手画，原始测量需要老师确认。
2. 实验思考题需要写在实验报告中。
3. 实验体会、意见和建议写在实验结论之后。

实验三 射极跟随器

3.1 实验目的

- 1. 掌握射极跟随器的特性及测试方法。
- 2. 进一步学习放大器各项参数测试方法。

3.2 实验预习要求

- 1. 复习有关射极跟随器的工作原理，掌握射极跟随器的性能特点，并了解其在电子线路中的应用。
- 2. 根据图 3-2 的元器件参数值估算静态工作点，并画出交、直流负载线。
- 3. 使用实验一或者实验二测得的 β 值，进行输入电阻、输出电阻的计算

3.3 实验仪器与器件

表 3-1 实验仪器与器件列表

	名称	数量	型号
1	直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke287C
3	手持万用表	1 台	Fluke 17B+
4	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
5	示波器	1 台	Tek MSO2012B
6	电阻	若干	1k Ω ×1, 2k Ω ×1, 20k Ω ×1, 100 k Ω ×1
7	可变电阻	1 个	100k Ω ×1
8	三极管	1 个	9013
9	电容	若干	10 μ F×2
10	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
11	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

3.4 实验原理

图 3-1 是一个共集组态的单管放大电路，输入信号和输出信号的公共端是晶体管的集电极，所以属于共集组态。又由于输出信号从发射极引出，因此这种电路也称为射极输出器或射极跟随器，它是一个电压串联负反馈放大电路，具有输入电阻高，输出电阻低，电压放大倍数接近于 1，输出电压能够在较大范围内跟随输入电压做线性变化以及输入、输出信号同相等特点。

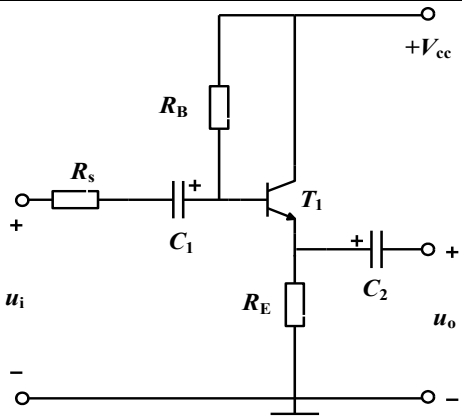


图 3-1 射极跟随器

3.4.1 静态工作点

实验中，可在静态 $U_i = 0$ ，测得晶体管的各电极电位 V_B 、 V_C 、 V_E ，然后由下列公式计算出静态工作点的各个参数：

$$U_{BE} = V_B - V_E$$

$$I_C \approx I_E = (1 + \beta)I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_B}{R_B} \quad \text{或} \quad I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - V_E$$

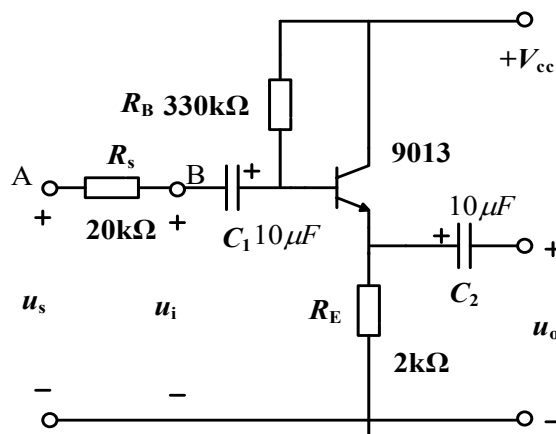


图 3-2 射极跟随器的实验线路图

3.4.2 放大电路动态性能指标

1) 输入电阻 R_i : 图 3-2 为射极跟随器的实验线路图

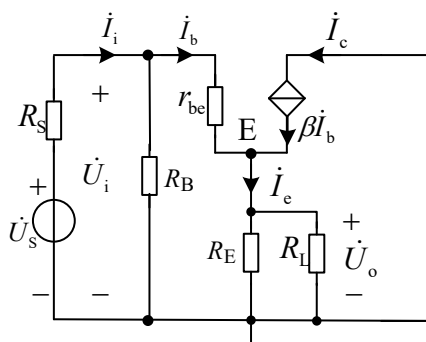


图 3-3 射极跟随器的微变等效电路

如果不考虑负载 R_L 的影响， $R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R_E]$

如果负载 R_L 的影响，则： $R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$

由上式知，射极跟随器的输入电阻 R_i 比共射极基本放大电路的输入电阻 R_i ($R_i = R_B // r_{be}$)要高很多。在本次实验中， $r_{be} = 2k\Omega$ 。

射极跟随器的实验电路如图 3-2 所示。输入电阻的测试方法：只要测得 A、B 两点的对地电位，按照下面公式即可计算出 R_i 。

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s$$

2) 输出电阻 R_o : 根据理论教材，

信号源内阻很小的情况下，射极跟随器的输出电阻 R_o 为 $R_o = \frac{r_{be}}{1 + \beta} // R_E \approx \frac{r_{be}}{1 + \beta}$

信号源内阻较大的情况下，射极跟随器的输出电阻 R_o 为 $R_o = \frac{R_B // R_s + r_{be}}{1 + \beta} // R_E \approx \frac{R_B // R_s + r_{be}}{1 + \beta}$

由上式可知，射极跟随器的输出电阻 R_o 比共射极基本放大电路的输出电阻 R_o ($R_o \approx R_C$) 低很多。晶体管的 β 越高，输出电阻越小。

输出电阻 R_o 的测试方法:先测出空载输出电压 U_o ，再测接入负载 R_L 后的输出电压 U_L ，根据 $U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$ ，

即可推导出输出电阻 R_o 的计算公式如下： $R_o = (\frac{U_o}{U_L} - 1)R_L$

3) 电压放大倍数 A_u

射极跟随器的电压放大倍数 A_u 为

$$A_u = \frac{(1 + \beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)} \leq 1$$

上式说明射极跟随器的电压放大倍数 A_u 小于近于 1，且为正值，这是深度电压负反馈的结果。但它的射极电流仍比基极电流大 $(1 + \beta)$ 倍，所以它具有一定的电流和功率放大作用。

电压放大倍数 A_u 和 A_{us} 可通过测量 U_s 、 U_i 、 U_o 的有效值计算求出。

3.5 实验步骤

1. 测定静态工作点

按图 3-2 所示连接射极跟随器实验电路。接通+12V 直流电源，在 B 点加入频率为 1kHz 的正弦交流信号 u_i ，（参考值： u_i 有效值调至 1~2V 左右），用示波器观察输入电压和输出电压波形，保证输出无失真波形，然后置关闭信号源 $u_i=0$ ，断开信号源的连线，用万用表直流电压档，测量晶体管各极对地电位，将测得数据计入表 3-2 中。

表 3-2 射极跟随器静态工作点数据表

测量值			计算值			
V_E/V	V_B/V	V_C/V	V_{BE}/V	V_{CE}/V	I_E/mA	I_B/mA

在下面整个测试过程中，保持 R_B 不变，即静态工作点不变。

2. 测量电压放大倍数 A_u

接入负载 R_L 为 1k Ω ，在 B 点加入频率为 1kHz 的正弦交流信号 u_i （参考值： u_i 有效值调至 1~2V 左右），调节输入信号幅度，用示波器观察输入电压 u_i 和输出波形 u_o ，在输出最大不失真情况下，用交流毫伏表或者 F287C 的交流电压档测 U_i 、 U_o 、 U_s 值。计入表 3-3 中。计算放大倍数。

接入负载 R_L 为 1k Ω ，在 A 点加入频率 1kHz 的正弦交流信号 u_s ，调节输入信号幅度，保持 u_i 与上步骤中的数值基本相等，用示波器观察输入电压 u_i 和输出波形 u_o ，在输出最大不失真情况下，用交流毫伏表或者 F287C 的交流电压档测 U_s 、 U_o 、 U_i 值。计入表 3-3 中。计算放大倍数。

表 3-3 射极跟随器放大倍数测量数据表

	测量值			计算值	
	U_i/V	U_s/V	U_o/V ($R_L=1k\Omega$)	A_u	A_{us}
A 点					
B 点					

3. 测试跟随特性

接入负载 R_L 为 1k Ω ，在 B 点加入频率为 1kHz 的正弦交流信号 u_i ，逐渐加大信号幅度（0 到最大不失真点均匀间隔取值），用示波器观察输入电压 u_i 和输出波形 u_L ，在输出最大不失真情况下，测量对应的输出电压 U_L ，计入表 3-4 中（需选择较宽范围的 U_i ）。

表 3-4 射极跟随器跟随特性测量数据表

U_i/V								
U_L/V								

4. 测量输入电阻 R_i

负载为空载，在 A 点加入频率 1kHz 的正弦交流信号 u_s （参考： u_s 调至 1~2V 左右），用示波器观察输入电压和输出波形，保证输出无失真，用交流毫伏表的的交流电压档分别测量 A、B 点对地的电位 U_s 、 U_i ，计入表 3-5 中，然后接入负载 R_L 为 1k Ω ，重复上述操作，计入表 3-5 中。计算输入电阻测量值，与理论计算值比较，分析误差产生的原因，并分析空载和带载两组数据的差异。

表 3-5 射极跟随器输出电阻测量数据表

	U_s/mV	U_i/mV	$R_i/k\Omega$	
			测量值	理论值
空载				
$R_L=1k\Omega$				

5. 测量输出电阻 R_o

接入负载 R_L 为 1k Ω ，在 A 点接入频率为 1kHz 的正弦交流信号 u_s （参考： u_s 调至 1~2V 左右），用示波器观察输入电压 u_s 和输出波形 u_o ，保证输出无失真，测量空载时输出电压 U_o 和有负载时输出电压 U_L ，计入表 3-6 中。在 B 点接入频率为 1kHz 的正弦交流信号，重复上述操作，计入表 3-6 中。计算输出电阻测量值，与理论计算值比较，分析误差产生的原因，并分析 A 点接入和 B 点接入两组数据的差异。

测量的输入电阻和输出电阻，与理论计算值比较，分析误差产生的原因。

表 3-6 射极跟随器输出电阻测量数据表

	U_L/V	U_o/V	$R_o/k\Omega$	
			测量值	理论值
A 点接入				
B 点接入				

6. 测试频率响应特性

不接负载，在 B 点接入输入信号 u_i ，其幅度为有效值 0.7V 且恒定不变，以 $f = 10kHz$ 为基本频率，分别向上和向下调节频率，用交流毫伏表(注意不是万用表)测量不同频率下的输出电压 U_o ，填入表 3-7 中。并在坐标纸中，绘制幅频响应曲线图 $A_u=F(f)$ 。

表 3-7 射极跟随器幅频特性测量数据表 $U_i=V$

		低频			f_0			高频	
f	10Hz	50Hz	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz	2MHz	3MHz
U_i/V									
U_o/V									
$A_u=U_o/U_i$									

3.6 注意事项

- (1) 实验中，要将直流稳压电源、函数信号发生器、示波器等电子仪器和实验电路共地，以免引起干扰。
- (2) 步骤 6 中，测试频率达到 1MHz 以上时，需要注意信号源到电路的接线，紧凑紧密，降低各部分的接

触电阻。

- (3) 实验过程中不允许带电换线、换元件，每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
- (4) 在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

3.7 故障分析与检查排除

参考实验一 1.7。

3.8 实验思考题

1. 测量放大器静态工作点时，如果测得 $U_{CE} < 0.5V$ ，说明晶体管处于什么工作状态？如果测得 $U_{CE} \approx U_{CC}$ ，晶体管又处于什么工作状态？
2. 在图 3-2 所示的实验电路中，偏置电阻 R_B 起什么作用？
3. 在测试表 3-7 时，当频率达到 100kHz 以上时，为什么不能使用 F287C 测量，而需要使用电子毫伏表，请在网络上搜索两个设备的资料来回答问题。

实验四 带负反馈的两级交流电压放大电路

4.1 实验目的

1. 加深理解反馈放大电路的工作原理及负反馈对放大电路性能的影响。
2. 掌握电压串联负反馈的组成及方法，能够理论结合实验结果分析引入负反馈后对于放大电路各项性能指标的影响
3. 学习反馈放大电路性能的测试方法。

4.2 实验预习要求

1. 复习负反馈对放大器性能指标的改善及多级阻容耦合放大器的计算方法。
2. 掌握放大电路的静态和动态的测试方法。
3. 实验之前必须明确本次试验的目的、意义、实验原理，实验电路图。

4.3 实验仪器与器件

表 4-1 实验仪器与器件列表

	名称	数量	型号
1	直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke287C
3	手持万用表	1 台	Fluke 17B+
4	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
5	示波器	1 台	Tek MSO2012B
6	电阻	1 只	2kΩ×1
7	反馈放大电路模块	1 块	ST2002
8	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
9	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

4.4 实验原理

4.4.1 两级电压放大电路的电压放大倍数 A_u

对于两级电压放大电路，习惯上规定第一级是从信号源到第二个晶体管 T_2 的基极，第二级是从第二个晶体管 T_2 的基极到负载，这样两级放大器的总的电压放大倍数 A_u 为：

$$A_u = \frac{V_{o2}}{V_s} = \frac{V_{o2}}{V_{i1}} = \frac{V_{o2}}{V_{i1}} = \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \times \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = A_{u1} \times A_{u2}$$

式中电压均为有效值，且 $V_{o1}=V_{i2}$ ，由此可见，两级放大器的总的电压放大倍数是单级电压放大倍数的乘积，由结论可推广到多级放大器。

当忽略信号源内阻 R_s 和偏流电阻 R_b 的影响，放大器的中频电压放大倍数为：

$$A_{u1} = \frac{V_{o1}}{V_s} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = -\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} = -\beta_1 \frac{R_{c1} // r_{i2}}{r_{be1}}$$

$$A_{u2} = \frac{V_{o2}}{V_{i1}} = \frac{V_{o2}}{V_{o1}} = -\frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} = -\beta_2 \frac{R_{c2} // R_L}{r_{be2}}$$

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2} = \beta_1 \frac{R_{c1} // r_{i2}}{r_{be1}} \times \beta_2 \frac{R_{c2} // R_L}{r_{be2}}$$

必须要注意的是， A_{u1} 、 A_{u2} 都是考虑了下一级输入电阻（或负载）的影响，所以第一级的输出电压即为第二级的输入电压，而不是第一级的开路输出电压，当第一级放大倍数已计入下级输入电阻的影响后，在计算第二级放大倍数时，就不必再考虑前级的输出阻抗，否则计算就重复了。

在两级放大器中， β 和 I_E 的提高，必须全面考虑，是前后级相互影响的关系。

对两级电路参数相同的放大器，其单级通频带相同，而总的通频带将变窄。

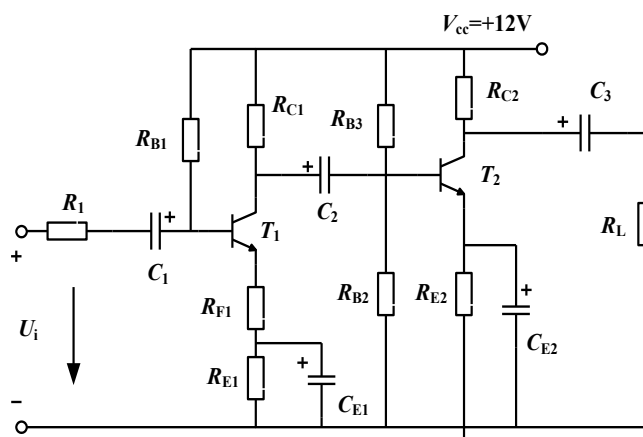


图 4-1 两级阻容耦合电压放大电路的原理图

4.4.2 带负反馈的两级阻容耦合电压放大电路

通常放大电路的输入信号都是很微弱的，一般为毫伏或微伏数量级。为了推动负载工作，因此要求把几个单级放大电路连接起来，使信号逐级得到放大。因此构成多级放大电路。级间的连接方式叫耦合，如耦合电路是采用电阻、电容耦合的叫阻容耦合放大电路。本试验采用的就是两级阻容耦合放大电路，如图 4-1 所示。其中两级之间是通过耦合电容 C_2 及偏置电阻连接，由于电容隔直作用，所以两极放大电路的静态工作点可以单独调试测定。

两级阻容耦合放大电路的电压放大倍数：

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2}$$

从表面看，通过对多个单级放大电路的适当级联，可以实现任意倍数的放大。似乎放大电路已经没有什么可以研究的了。但是，问题并不是这么简单。首先静态工作点与放大倍数是互相影响的，其次，放大倍数与输出电阻也可能互相影响，第三，输入电阻与放大倍数也可能互相影响。

图 4-2 为电压串联负反馈的两级阻容耦合电压放大电路，在电路中引入负反馈，可以解决上面的问题。

负反馈对放大电路性能主要有五个方面的影响：

①降低放大倍数

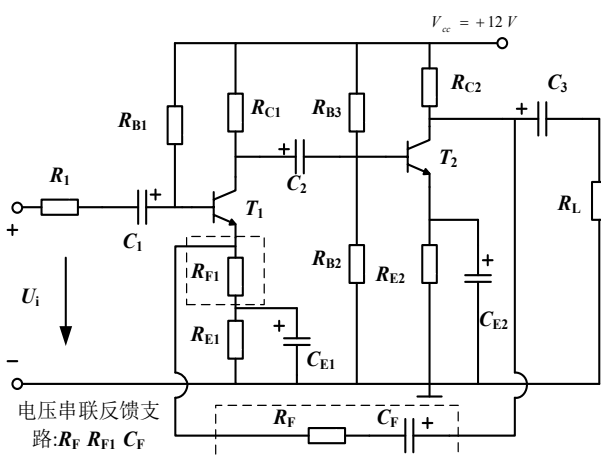


图 4-2 具有电压串联负反馈的两级阻容耦合电压放大电路

- ②提高放大倍数的稳定性
- ③改善波形失真
- ④展宽通频带
- ⑤对放大电路的输入电阻和输出电阻的影响

4.5 实验步骤

1. 按原理图接线

按照电路原理图选用“ST2002 反馈放大电路”模块，熟悉元件安装位置后，开始接线：一根连接直流电源输出的+12V 和电路图中的+12V 端；一根连接稳压电源负端和电路图中的 0V 端；线路经检查无误后，方可闭合电源开关。

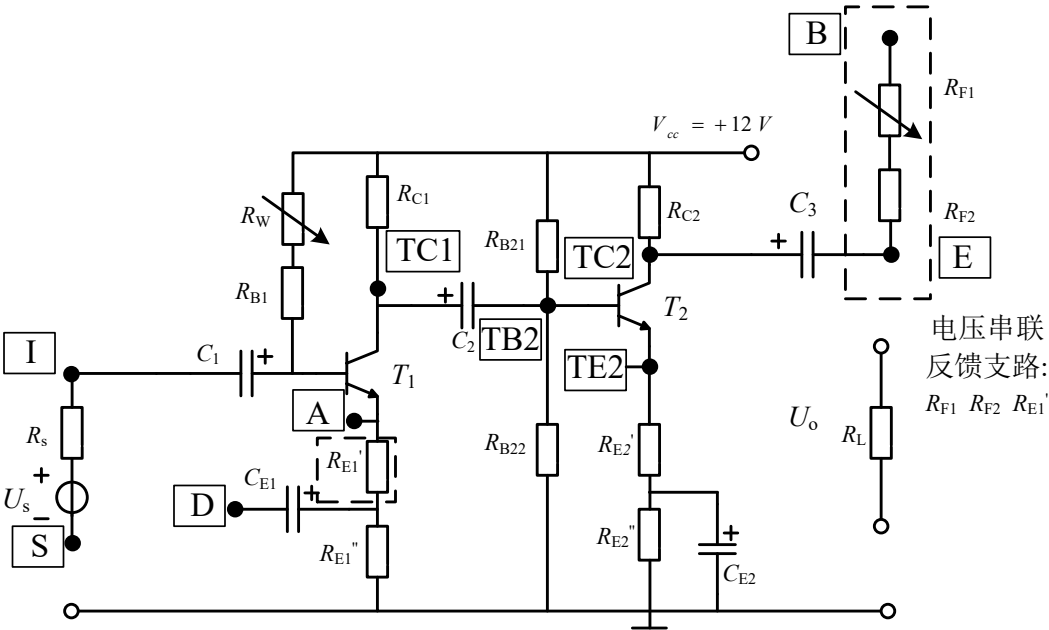


图 4-3 带电压串联负反馈的两级阻容耦合放大电路实验图

其中： $R_{F1}=1\text{k}\Omega$ ， $R_W=150\text{k}\Omega$ ， $C_2=C_3=0.47\mu\text{F}$ ， $C_7=C_8=0.01\mu\text{F}$ ， $C_1=10\mu\text{F}/25\text{V}$ ， $C_{E1}=C_{E2}=47\mu\text{F}/25\text{V}$ ， $R_{E1}'=R_{E2}'=10\Omega$ ， $R_{F2}=51\Omega$ ， $R_{C1}=R_{E1}''=120\Omega$ ， $R_{C2}=R_S=R_{E2}''=470\Omega$ ， $R_{B22}=1\text{k}\Omega$ ， $R_{B21}=1.5\text{k}\Omega$ ， $R_{B1}=10\text{k}\Omega$ ， $T_1=T_2=9013$ ，外接电阻 $R_L=2\text{k}\Omega$

2. 测定静态工作点

将电路 D 端接地，输出不接负载，AB 之间不连线（即无负反馈的情况）， R_W 调到中间合适位置。输入端（I 与 D 之间为 U_i ）接入信号源，令 $U_i=15\text{mV}$ 有效值， $f=1\text{kHz}$ ，调 R_W 使输出电压 U_o 为最大不失真，（示波器测量输入波形、输出电压波形时，使用 AC 耦合， U_o 尽量最大不失真），然后，撤出信号源，输入端（I）接地，用万用表测量下表 4-2 中各直流电位(对地)：

表 4-2 静态工作点电压测试

测量项目	V_{E1}	V_{C1}	V_{B2}	V_{E2}	V_{C2}
测量数据					

3. 测量放大电路的性能

将 D 端接地，AB 不连接（即无负反馈的情况）。

(1) 测量基本放大电路的放大倍数 A_u 。

令 $U_i=15\text{mV}$, $f=1\text{kHz}$ 不接 R_L , 用万用表/示波器测量 U_o 有效值记入表 4-3, 并用公式 $A_u=U_o/U_i$ 求取电压放大倍数 A_u 。

(2) 测量基本放大电路的输出电阻 r_o 。

仍令 $U_i=15\text{mV}$, $f=1\text{kHz}$, 接入负载电阻 $R_L=2\text{k}\Omega$, 测输出电压 U'_o 并记入表 4-3, 则

$$r_o = \frac{U_o - U'_o}{U'_o} R_L = \left(\frac{U_o}{U'_o} - 1 \right) R_L$$

式中 U_o 是未接负载电阻 R_L 时的输出电压; U'_o 是接负载电阻 R_L 后的输出电压。

设接负载 R_L 后的电压放大倍数为 A'_u , 则 $A'_u = U'_o/U_i$

(3) 观察负反馈对波形失真的改善

拆下负载电阻 R_L , 当 AB 不连线时, 令 U_i 值增大, 从示波器上看输出电压的波形失真; 而当 AB 连线时, R_{F1} 调到中间位置, 在同样大的 U_i 值下, 波形则不失真。

(4) 测量基本放大电路的输入电阻 r_i

断开 AB 联系, 在电路的输入端接入 $R_s=470\Omega$ (电阻已在模块内部, 无需外接), 把信号发生器的两端接在 U_s 两端 (图中 S 与 0V 之间), 加大信号源电压, 使放大电路的输入信号仍为 15mV (即 I 与 D 之间为 $U_i=15\text{mV}$), 测量此时信号源电压 U_s , 并记录表 4-3, 则

$$r_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s$$

4. 测定反馈放大电路的性能

将 AB 连线, R_{F1} 调到中间位置, 即有反馈放大电路。

(1) 测量反馈放大电路的放大倍数 A_{uf}

与上同, 令 $U_i=15\text{mV}$, $f=1\text{kHz}$, 不接 R_L , 测量 U_{of} , 并记入表 4-3 中, 并用公式 $A_{uf} = U_{of}/U_i$ 可求取电压放大倍数 A_{uf} 。

(2) 测量反馈放大电路输出电阻 r_{of}

仍令 $U_i=15\text{mV}$, $f=1\text{kHz}$, 接入 $R_L=2\text{k}\Omega$, 用万用表测量输出电压 U'_{of} 记入表 4-3 中, 并用公式 $r_{of} = (U_{of}/U'_{of} - 1)R_L$ 来计算 r_{of} , 用 $A'_{uf} = U'_{of}/U_i$ 求取 A'_{uf} 。

表 4-3 有反馈的放大电路的基本性能测试表格

测量电路	测量项目				计算项目			
基本放大电路(无反馈)	U_i	U_o (不接 R_L)	U'_o (接 R_L)	U_s (接 R_s)	A_u (不接 R_L)	A'_u (接 R_L)	r_i	r_o
	15mV $f=1\text{kHz}$							
反馈放大电路(AB 连接)	U_i	U_{of} (不接 R_L)	U'_{of} (接 R_L)	U_{sf} (接 R_s)	A_{uf} (不接 R_L)	A'_{uf} (接 R_L)	r_{if}	r_{of}
	15mV $f=1\text{kHz}$							

(3) 测量反馈放大电路输入电阻 r_{if}

与上同, 在电路输入端接入 $R_s=470\Omega$, 把信号发生器的两端接在 U_s 两端, 加大信号源电压, 使放大电路的输入信号仍为 15mV , 测量此时信号源电压 U_{sf} , 并记入表 4-3。则

$$r_{if} = \frac{U_i}{U_{sf} - U_i} R_s$$

5. 比较无反馈和有反馈放大电路的通频带性能

- (1) 将 D 端接地，AB 不连接(即无负反馈的情况)。
- (2) 测量不同频率下无反馈放大电路的放大倍数 A_u 。
- (3) 令 $U_i=15\text{mV}$ (I 与 D 之间)，调节频率，确定通频带及 5 个特征频率点（包括下限截止频率 f_L ，上限截止频率 f_H ，以及低频段、中频段、高频段中的频率点各一个），在表 4-4 记录下输入信号的实际频率和有效值大小，不接 R_L ，用万用表/示波器测量 5 个频率下 U_o 有效值记入表 4-4，并用公式 $A_u=U_o/U_i$ 求取电压放大倍数 A_u 。
- (4) 将 AB 连线， R_{F1} 调到中间位置，即有反馈放大电路。
- (5) 测量不同频率下反馈放大电路的放大倍数 A_u 。
- (6) 与上同，令 $U_i=15\text{mV}$ ，重复步骤（2），不接 R_L ，测量 U_{of} ，并记入表 4-4 中，并用公式 $A_{uf} = U_{of}/U_i$ 可求取电压放大倍数 A_{uf} 。
- (7) 根据表 4-4 数据，画出无反馈和有反馈放大电路的幅频特性曲线（Y 轴放大倍数 A_u ，X 轴频率 f ）。

表 4-4 有无反馈的放大电路的通频带性能测试表格

测量电路	测量项目			计算项目
基本放大电路(无反馈)	U_i (参考) 有效值, 频率	U_i (实际) 有效值, 频率	U_o (不接 R_L)	A_u (不接 R_L)
	15mV $f_1=$ Hz			
	15mV $f_L=$ Hz			
	15mV $f_2=$ Hz			
	15mV $f_H=$ Hz			
	15mV $f_3=$ Hz			
反馈放大电路(AB 连接)	U_i (参考) 有效值, 频率	U_i (实际) 有效值, 频率	U_{of} (不接 R_L)	A_{uf} (不接 R_L)
	15mV $f_1=$ Hz			
	15mV $f_L=$ Hz			
	15mV $f_2=$ Hz			
	15mV $f_H=$ Hz			
	15mV $f_3=$ Hz			

4.6 注意事项

- (1) 不允许带电接线。
- (2) 实验过程中不允许带电换线、换元件，每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
- (3) 在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

4.7 故障分析与检查排除

参考实验一 1.7。

4.8 实验思考题

1. 结合测试数据，总结电压串联负反馈对放大电路性能的影响，包括输入电阻，输出电阻，放大倍数及波形失真的改善等；
2. 如果测量时发现放大倍数 A_u 远小于设计值，可能是什么原因造成的？
3. 测量放大电路输入电阻时，若串联电阻的阻值 R_s 比其输入电阻的值大很多或小很多，对测量结果有何影响？

4.9 实验报告要求

1. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，波形必须手写、手画，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
2. 实验思考题、实验体会、意见和建议需要写在实验报告中。

实验五 有源滤波电路的研究

5.1 实验目的

1. 掌握有源滤波器的组成原理及滤波特性，学会用运算放大器、电阻、电容设计组成的有源低通、高通、带通、带阻滤波器。
2. 掌握仿真软件 ORCAD PSPICE 的使用。
3. 学习 RC 有源滤波器的设计，并用仿真软件验证其工作特性。
4. 学会调节滤波器截止频率及了解等效 Q 值对滤波器幅频特性的影响。

5.2 实验预习要求

1. 复习有源滤波器的基本理论知识；
2. 阅读实验指导书，理解实验原理，了解实验步骤。
3. 提前学习仿真软件 ORCAD PSPICE 的使用方法。

5.3 实验仪器与器件

ORCAD PSPICE 软件 SPB 16.6

5.4 实验原理

5.4.1 Pspice 简介

Pspice 是由 SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 发展而来的用于微机系列的通用电路分析程序。Pspice 软件是一个通用的电路分析程序，它可以仿真和计算电路的性能。由于该软件提供了丰富的元件库，使得各种常用元器件随手可得，在软件上我们可以搭接任何模拟和数字或者数模混合电路。该软件使用的编程语言简单易学，对电路的计算和仿真快速而准确，强大的图形后处理程序可以将电路中的各电量以图形的方式显示在计算机的屏幕上，就像一个多功能、多窗口的示波器一样。PSPICE 软件具有强大的电路图绘制功能、电路模拟仿真功能、图形后处理功能和元器件符号制作功能，以图形方式输入，自动进行电路检查，生成图表，模拟和计算电路。它的用途非常广泛，不仅可以用于电路分析和优化设计，还可用于电子线路、电路和信号与系统等课程的计算机辅助教学。与印制版设计软件配合使用，还可实现电子设计自动化。被公认是通用电路模拟程序中最优秀的软件，具有广阔的应用前景。

5.4.2 有源滤波电路

若滤波电路含有有源元件（双极型管、单极型管、集成运放）组成，成为有源滤波电路。有运算放大器和阻容元件组成的选频网络。用于传输有用频段的信号，抑制或衰减无用频段的信号。滤波器阶数越高，性能越逼近理想滤波器特性。有源滤波器主要分为四类：低通滤波器（LPF），高通滤波器（HPF），带通滤

波器（BPF），带阻滤波器（BEF）。

集成运算放大器是具有高开环电压放大倍数的多级直接耦合放大器。它具有体积小、功耗低、可靠性高等优点，广泛应用于信号的运算、处理和测量以及波形的发生等方面。

（1）有源低通滤波器

低通滤波器是一种用来传输低频段信号，抑制高频段信号的电路。

一阶有源低通滤波器，如图 5-1（a）所示，其传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{A_0}{1 + sRC}$$

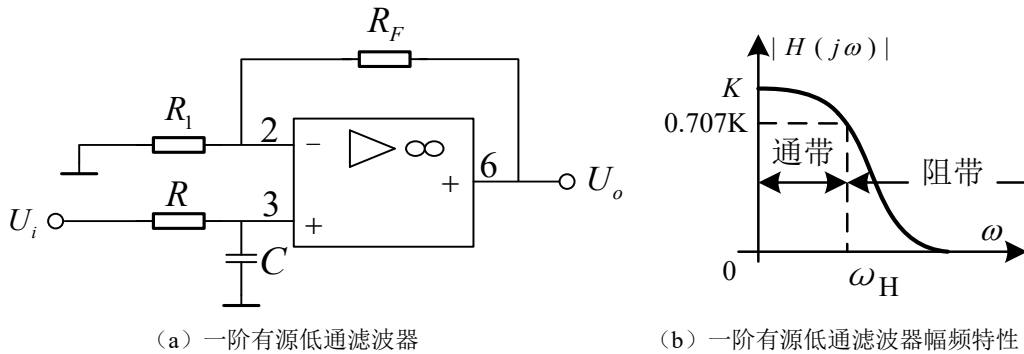


图 5-1 一阶有源低通滤波器电路及特性

一阶有源低通滤波器频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}}$$

式中 A_0 —通带内放大倍数， $A_0 = 1 + \frac{R_F}{R_1}$ ； ω_H —上限截止角频率， $\omega_H = 1/RC$ ，幅频特性曲线见图 5-1

（b）。

二阶有源低通滤波器有多种电路连接形式，如图 5-2 和图 5-3 所示有源滤波器都是二阶有源低通滤波器，但滤波器特征参数略有不同。

如图 5-2 所示二阶压控电压源有源低通滤波器的频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + j \frac{\omega}{Q\omega_0}}$$

式中， $A_0 = 1 + \frac{R_F}{R_1}$ ， $\omega_0 = 1/RC$ ， $Q = \frac{1}{3 - A_0}$ 。 Q 为等效品质因素，与 A_0 有关。 A_0 大于 3，滤波器极点落在

s 右半平面，将会产生自激振荡。

如图 5-3 所示，二阶有源低通滤波器的频率特性与二阶压控电压源有源低通滤波器的频率特性相似，即

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + j \frac{\omega}{Q\omega_0}}$$

式中 $\omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1C_2}}$, $Q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$ 。

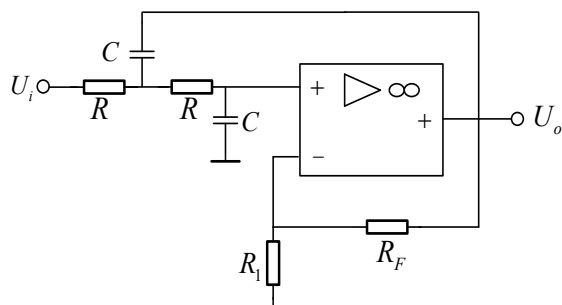


图 5-2 二阶压控电压源有源低通滤波器

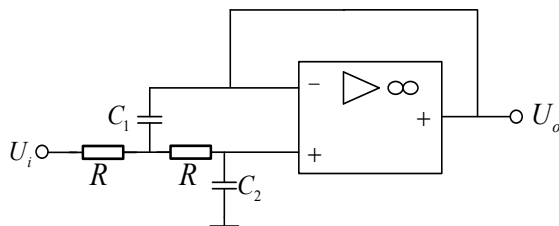


图 5-3 二阶有源低通滤波器

两有源低通滤波器频率特性的表达式相同，所以他们有相似的频率特性。两有源低通滤波器的差异：首先，是通带内放大倍数，一个是 A_0 ，另一个是 1；其次，是两有源低通滤波器的等效品质因素 Q 的表达式不一样，一个取决于 A_0 ，另一个取决于电容比值。

二阶有源低通滤波器幅频特性曲线和一阶有源低通滤波器不同：在 $Q=0.707$ 时，两者幅频特性曲线相似，但二阶有源低通滤波器是按 40dB/10 倍频的速率衰减，一阶有源低通滤波器是按 20dB/10 倍率的速率衰减，即二阶滤波器有较好的衰减特性；其二是 $Q>0.707$ 时二阶有源低通滤波器在 ω_0 处出现峰值。

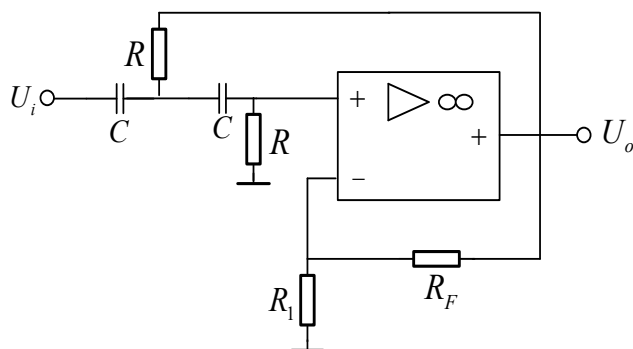
(2) 高通有源滤波器

高通滤波器是一种用来传输高频段信号，抑制或衰减低频段信号的电路。将低通滤波器中电阻电容位置互换，低通滤波器就变换为高通滤波器。二阶压控电压源高通有源滤波器，如图 5-4 (a) 所示。其频率特性为

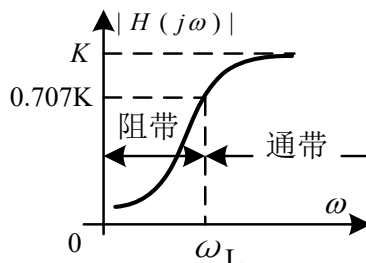
$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 - (\frac{\omega_0}{\omega})^2 - j\frac{\omega_0}{Q\omega}}$$

式中， $A_0 = 1 + \frac{R_F}{R_1}$, $\omega_0 = 1/RC$, $Q = \frac{1}{3 - A_0}$ 。二阶压控电压源高通有源滤波器幅频特性如图 5-4 (b) 所示，

阻带内衰减速率也是 40dB/10 倍频，且 $Q>0.707$ 时出现峰值。



(a) 二阶压控电压源有源高通滤波器



(b) 二阶有源高通滤波器幅频特性

图 5-4 二阶有源高通滤波器特性

(3) 二阶有源带通滤波器

带通滤波器的作用是只允许在某一个通频带范围内的信号，而比通频带下限频率低和比上限频率高的信

号均加以抑制或者衰减。如图 5-5 (a) 所示，二阶低通滤波器其中一级改成高通就构成了基本的二阶有源带通滤波器。

二阶压控电压源带通有源滤波器，如图 5-5 所示。其频率特性为

$$H(j\omega) = \frac{A_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

式中， $\omega_0 = 1/RC$ 称为中心频率， $A_0 = \frac{R_1 + R_F}{2R_1 - R_F}$ ， $Q = \frac{R_1}{2R_1 - R_F}$ 。带通滤波器幅频特性与谐振特性类似，可自行分析。

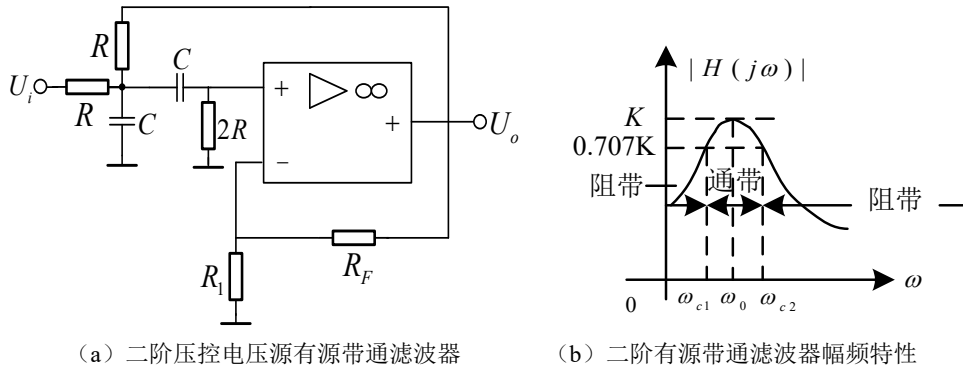


图 5-5 二阶有源带通滤波器特性

(4) 二阶带阻滤波器

带阻滤波器是可以用来抑制或衰减某一频段信号，并让该频段以外的所有信号都通过的滤波器。如图 5-6 (a) 所示，无源低通滤波器和无源高通滤波器并联构成的双 T 网络，加上一级同相比例放大器就构成了基本的二阶有源带阻滤波器。

$$A_u = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j2(2 - A_0)\frac{\omega}{\omega_0}} \times A_0$$

式中， $\omega_0 = 1/RC$ 称为中心频率， $A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ ， $Q = \frac{1}{2(2-A_0)}$ 。

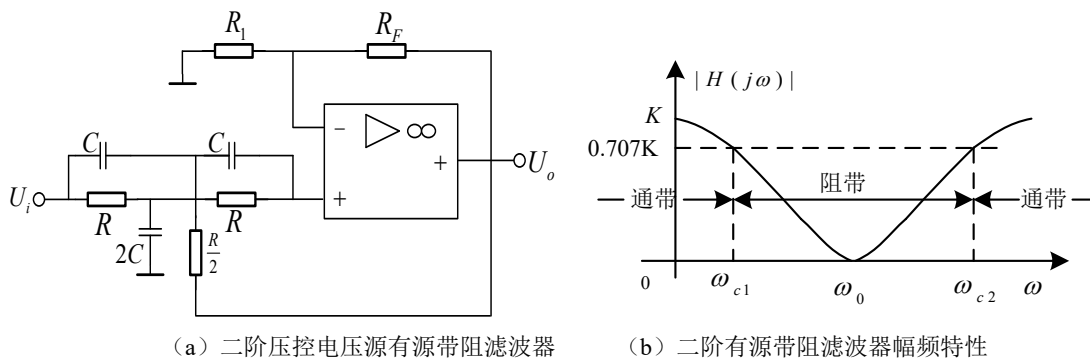


图 5-6 二阶有源带阻滤波器特性

5.5 实验步骤

注意事项:

1. 注意运放芯片的正负输入端与其他元器件的连接;
2. 注意连线不要错误交错连接, 连接处会有圆点。
3. 切记需要放置模拟地 0/Source。

1. 一阶有源低通滤波器时域仿真

(1) 启动 Cadence→ORCAD→ORCAD Capture→在主页下创建一个工程项目 Active filter。

- ①选 File/New/ Project
- ②建立一个子目录→Create Dir (键入 e:\AF), 并双击、打开子目录;
- ③选中 ● Analog or Mixed- Signal Circuit
- ④键入工程项目名 Active filter;
- ⑤在设计项目创建方式选择对话下, 选中 ● Create a blank pro

(2) 画电路图

①打开库浏览器选择菜单 Place/Part → Add Library (先添加模型库, 才能在相对于的库中找到元器件),

地的选择不是在 Place part, 而是在 Place ground 中选择名称为 0/Place ground。如图 5-7。

注意: 选择库的时候, 需要在 Library/Pspice 文件夹下面选择器件库, 采用对应的器件的仿真模型。

提取: LM741、电阻 R、电容 C (analog 库)、电源 VDC (source 库)、输入信号源 VSIN。

②移动元器件。

鼠标选中元、器件并单击 (元、器件符号变为红色), 然后压住鼠标左键拖到合适位置, 放开鼠标左键即可。

③删除某一元器件。

鼠标选中该元器件并单击 (元器件符号变为红色), delete。

④翻转或旋转某一元器件符号。

鼠标选中该元器件并单击 (元器件符号变为红色), 右键, 选择 rotate。

⑤画电路连线

选择菜单中 Place/wire

⑥为了突出输出端, 需要键入标注 Out 字符, 选择菜单 Place/Net Alias → Out, 放置到输出端。

⑦放大缩小快捷键。

放大: Ctrl+鼠标中键向前; 缩小: Ctrl+鼠标中键向后。

⑧从连线模式到放器件模式。

点击 select

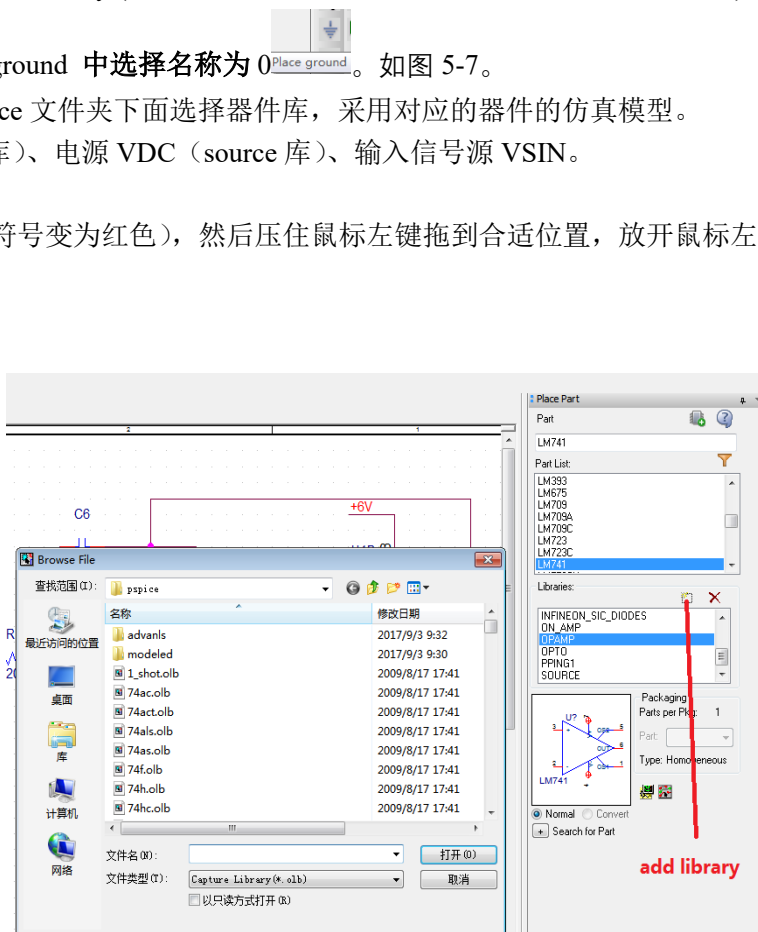


图 5-7 放置元器件, 增加元器件库界面图

(3) 修改元器件的标号和参数

用鼠标箭头双击该元件符号显示的标号和参数，此时出现修改框，即可进入标号和参数的设置，修改完记得要点 OK。按图 5-8 的参数搭建电路图。

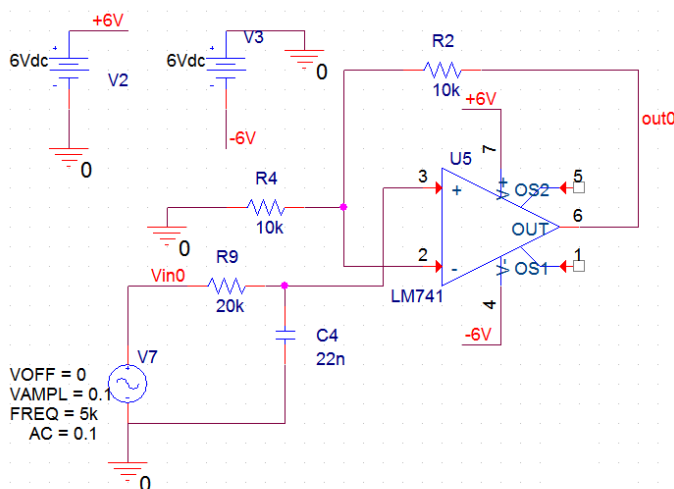
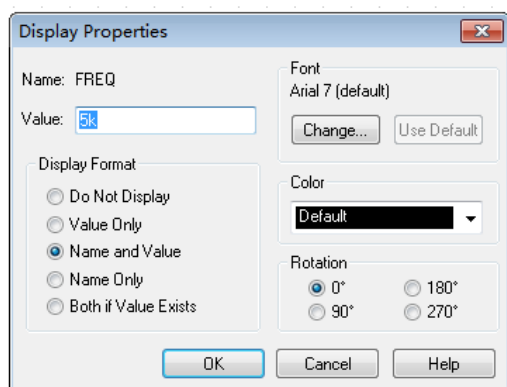
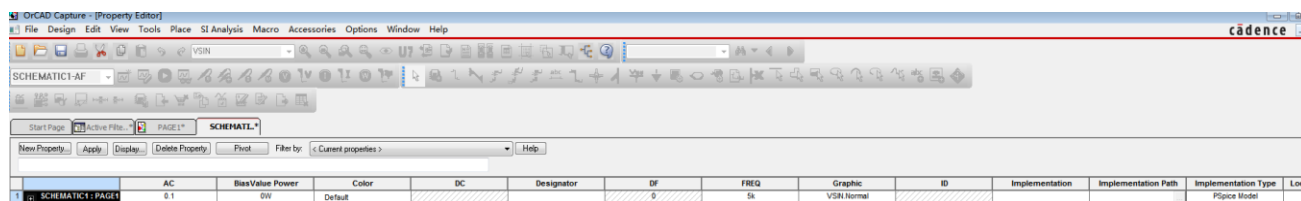


图 5-8 一阶有源低通滤波器仿真电路图



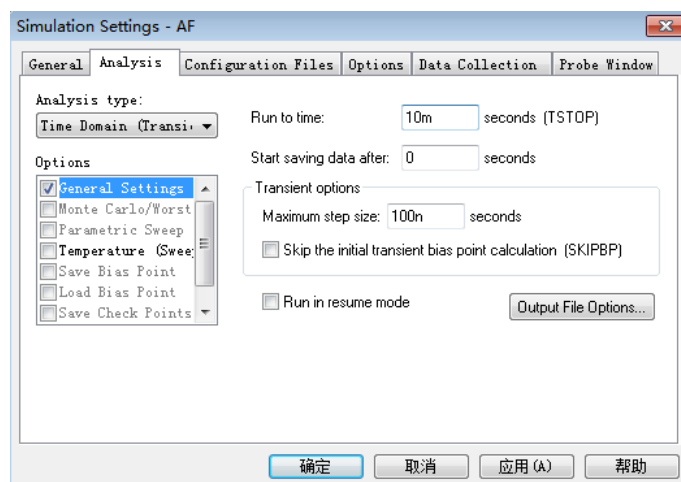
器件	模型	模型库
输入信号源	VSIN	SOURCE
电源	VDC	SOURCE
电阻	R	ANALOG
电容	C	ANALOG
运算放大器	LM741	OPAMP
模拟地	0	Place Ground (菜单)



(4) 设置分析功能


Time domain (时域分析)

①选择菜单 PSpice /New Simulation Profile, 在 New Simulation 对话框下, 键入 AF1, 用鼠标单击 Create, 然后在屏幕上弹出模拟类型和参数设置框;



②在模拟类型和参数设置框下，见 Analysis type 栏目，用鼠标选中及单击 Time Domain → 然后，在 General Setting 栏目下键入下列数据：Run to time **5m**， maximum step size 1us.

(5) 仿真

仿真输出电压波形。①选择菜单 PSpice /RUN（或用鼠标点击符号 RUN ）。②若无出错，便可观察瞬态分析(时域分析)。单击菜单 Trace/Add Trace →弹出 Add Trace 对话框。单击 V(out)，单击 OK！返回（显示 V(out)波形），即为电路输出波形曲线。同样步骤，添加 V(in)，V(in_fil)（运放同相输入端）。

(6) 保存波形

在 SCHEMATITC 窗口里面，选择菜单 Window，点击“Copy to Clipboard”，在弹出的对话框里面，点击 background，让背景呈现透明，单击 OK，即可将波形复制到其他 Word 文档。

(7) 实验比较

修改 VSIN 电源的频率参数为 **200Hz**，重复步骤（5）到（6），比较两种情况下实验结果的差异，结合理论分析，得出仿真实验结论。

2. 一阶有源低通滤波器频域仿真

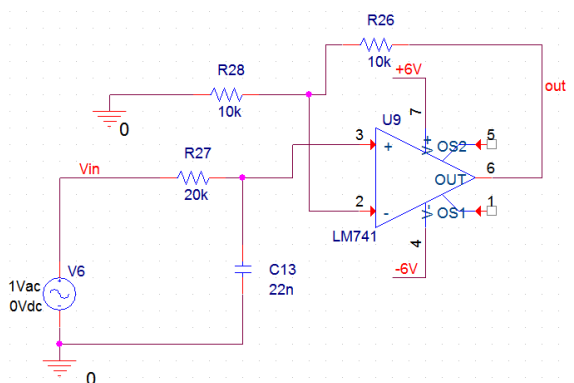


图 5-9 一阶有源低通滤波器频域仿真原理图

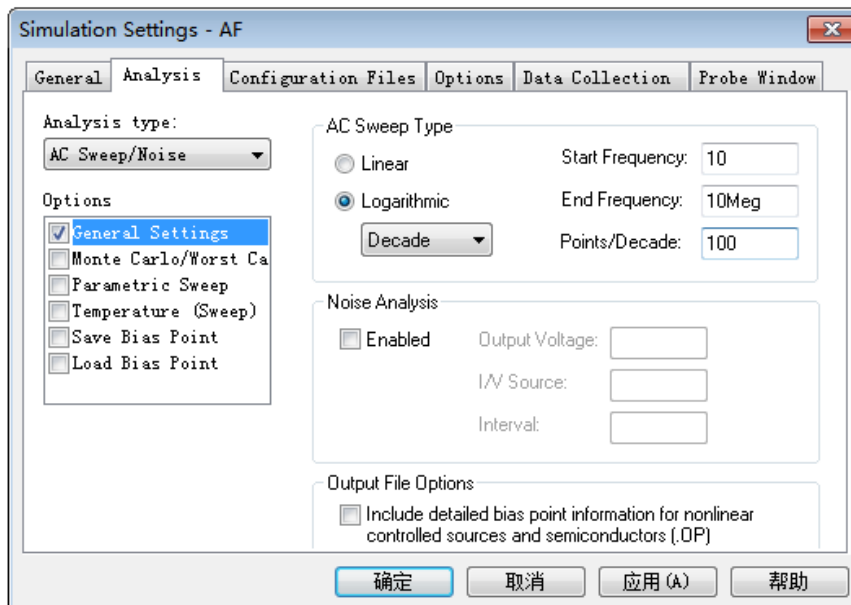
(1) 重复 1.中实验步骤 (1)，其中原理图见图 5-9，输入信号源由 VSIN 变为 VAC。

(2) 设置分析功能

AC Sweep (即频域分析)


将输入源更换为 VAC (SOURCE 库中)。

①选择菜单 PSpice /New Simulation Profile, 在 New Simulation 对话框下, 键入 AF2, 用鼠标单击 Create, 然后在屏幕上弹出模拟类型和参数设置框;



②在模拟类型和参数设置框下, 见 Analysis type 栏目, 用鼠标选中及单击 AC Sweep/Noise → 然后, 在 AC Sweep Type 栏目下键入下列数据: Start 10hz, End 100Meg, Points/ Decade =100

(5) 仿真

仿真输出电压波形。①选择菜单 PSpice /RUN (或用鼠标点击符号 RUN )。②若无出错, 便可观察频域分析。单击菜单 Trace/Add Trace → 弹出 Add Trace 对话框。单击 V(out), 单击 OK! 返回 (显示 V(out)波形), 即为幅频特性曲线。

(6) 保存波形

在 SCHEMATITC 窗口里面, 选择菜单 Window, 点击 “Copy to Clipboard”, 在弹出的对话框里面, 点击 background, 让背景呈现透明, 单击 OK, 即可将波形复制到其他 Word 文档。保存输出波形 V_{out} 并测量其截止频率, 同计算的截止频率相比较, 结合理论分析, 得出仿真实验结论。

3. 二阶有源低通滤波器频域仿真

重复 2.的操作步骤, 按图 5-10 的参数搭建电路图。AC Sweep 的参数设定为 Start 10, End 1Meg,

Points/Decade=100。通过改变 R_3 , R_4 的大小, 例如($R_3=10k\Omega$, $R_4=20k\Omega$), ($R_3=10k\Omega$, $R_4=10k\Omega$), ($R_3=20k\Omega$, $R_4=10k\Omega$), 来改变 Q 值的大小, 保存分析 Q 值大小对于二阶有源低通滤波器幅频特性的影响, 并同一阶有源滤波器幅频特性进行比较。

改变 R_3 , R_4 的大小, 在 $Q=\infty$ 时, 选择一合适的输入电压 (幅值、频率), 测试此电路的时域波形, 观察输入电压 VSIN 和输出电压 out 之间的关系, 得出结论, 分析理论和仿真是否一致。

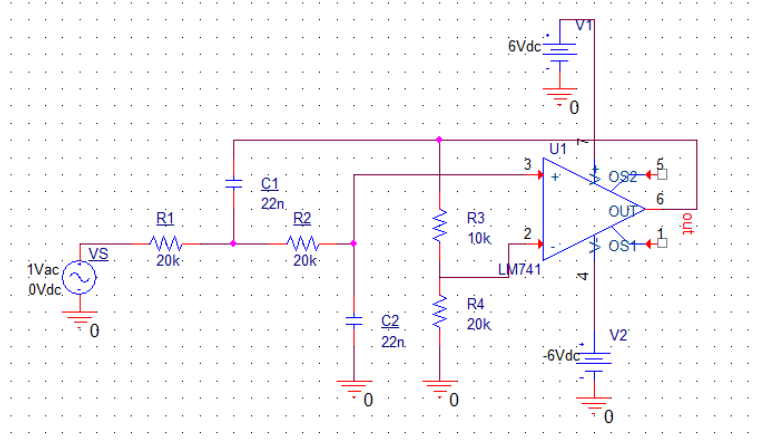


图 5-10 二阶有源低通滤波器仿真原理图

4. 二阶有源高通滤波器频域仿真

重复 2. 的操作步骤, 按图 5-11 的参数搭建电路图。AC Sweep 的参数设定为 Start 10, End 100k, Points/Decade=100。保存电路图截屏和输出波形 V_{out} 图, 并测量其截止频率, 同计算的截止频率相比较, 结合理论分析, 得出仿真实验结论。

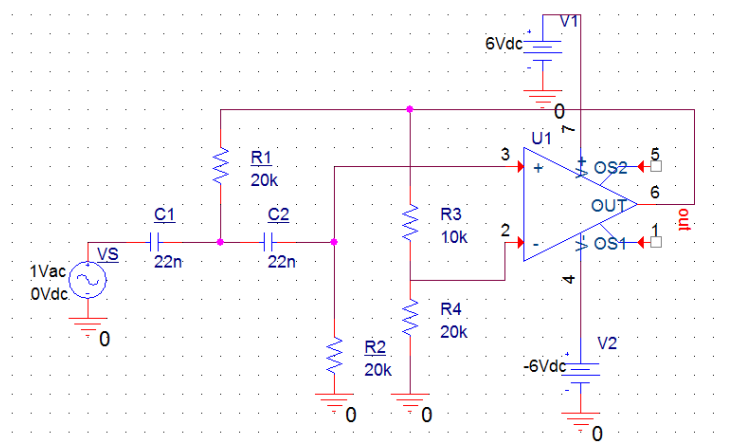


图 5-11 二阶有源高通滤波器仿真原理图

5. 二阶有源带通滤波器频域仿真

重复 2. 的操作步骤, 按图 5-12 的参数搭建电路图。AC Sweep 的参数设定为 Start 10, End 1000, Points/Decade=100。保存电路图截屏和输出波形 V_{out} 图, 并测量其中心频率, 同计算的截止频率相比较, 结合理论分析, 得出仿真实验结论。

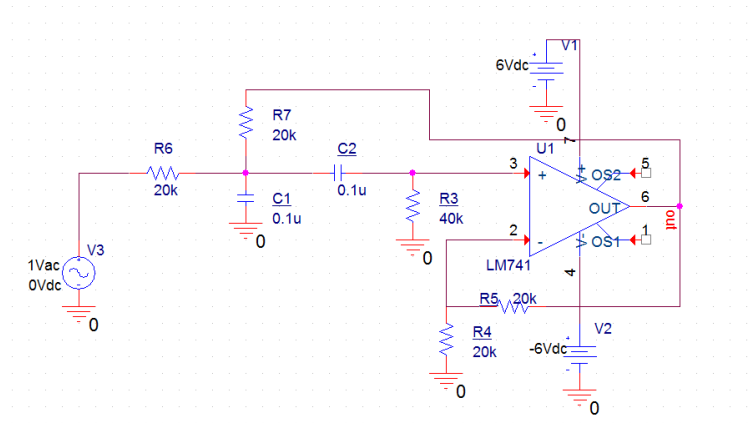


图 5-12 二阶有源带通滤波器仿真原理图

6. 二阶有源带阻滤波器频域仿真

重复 2. 的操作步骤, 按图 5-13 的参数搭建电路图。AC Sweep 的参数设定为 Start 10, End 1000, Points/Decade = 100。保存电路图截屏和输出波形 V_{out} 图, 并测量其中心频率, 同计算的截止频率相比较, 结合理论分析, 得出仿真实验结论。

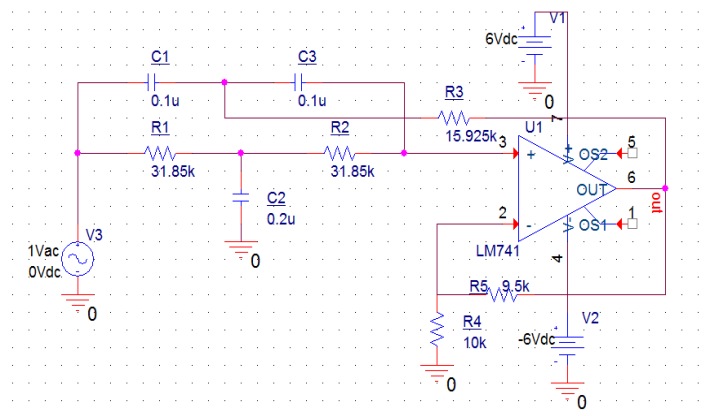


图 5-13 二阶有源带阻滤波器仿真原理图

5.6 实验思考题

1. 分析有源滤波器和无源滤波器的差异。
2. 是否可以运用两个运放搭建二阶有源滤波器, 如果可以, 和单个运放构成的二阶有源滤波器有什么差异。

5.7 实验报告要求

1. 原始仿真结果在课堂上需要老师确认, 每个仿真要求有仿真电路图以及仿真波形图以及结果分析。
2. 实验思考题需要写在实验报告中。
3. 实验体会、意见和建议写在实验结论之后。

实验六 集成运放的线性和非线性应用

6.1 实验目的

1. 掌握集成运算放大器的正确使用方法；
2. 掌握集成运算放大器的工作原理和基本特性；
3. 掌握利用运算放大器常用单元电路的设计和调试方法；
4. 掌握电压比较器电路的特点和电路的输出规律；
5. 掌握集成运算放大器非线性应用电路传输特性曲线的绘制步骤和方法。

6.2 实验预习要求

1. 复习集成运算放大器的基本理论知识；
2. 要求掌握 $\pm 15\text{V}$ 电源的连接方式；
3. 完成实验步骤中要求的理论计算的数值，填入预习报告中。
4. 使用 ORCAD 中的 PSPICE 软件仿真实验中所用的电路，将仿真电路图和仿真结果，填入预习报告中，或单独做成一份 word 文档打印出来作为预习报告。

6.3 实验仪器与器件

表 6-1 实验仪器和器件表

	名称	数量	型号
1	线性直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke 287C
3	示波器	1 台	Tek MSO2012B
4	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
5	交流毫伏表	1 台	SM2030A
6	电阻	若干	$100\Omega \times 1$ 、 $5.1\text{k}\Omega \times 1$ 、 $10\text{k}\Omega \times 4$ 、 $20\text{k}\Omega \times 2$ 、 $100\text{k}\Omega \times 2$
7	电容	若干	$0.01\mu\text{F} \times 2$ 、 $0.1\mu\text{F} \times 2$
8	集成运放	2 只	$\mu\text{A}741 \times 1$ 和 $\text{TL}071\text{CP} \times 1$
9	双向稳压管	1 只	2DW231 ($6.2\text{V} \times 1$)
10	直流信号源	1 块	ST2016 $-5\text{V} \sim +5\text{V}$
11	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
12	实验用 9 孔插件方板	1 块	$300\text{mm} \times 298\text{mm}$

6.4 实验原理

集成运算放大器是具有高开环电压放大倍数的多级直接耦合放大器。它具有体积小、功耗低、可靠性高等优点，广泛应用于信号的运算、处理和测量以及波形的发生等方面。

6.4.1 运算放大器的线性应用

从工作原理上,集成运算放大器可分为线性应用和非线性应用两个方面。在线性工作区内,其输出电压 u_o 与输入电压 u_i 的线性放大的关系为

$$u_o = A_{uo}(u_+ - u_-) = A_{uo}u_i$$

由于集成运算放大器的放大倍数 A_{uo} 高达 $10^4 \sim 10^7$, 若使 u_o 为有限值, 必须引入深度负反馈, 使线性区加宽, 构成集成运算放大器的线性运算电路。

在工程应用情况下, 将集成运放视为理想运放, 就是将集成运放的各项技术指标理想化, 满足下列条件的运算放大器称为理想运放, 即

- (1) 开环电压放大倍数 $A_{uo} = \infty$
- (2) 输入阻抗 $r_i = \infty$
- (3) 输出阻抗 $r_o = 0$
- (4) 带宽 $f_{BW} = \infty$
- (5) 失调与漂移均为零

本实验中使用的集成运算放大器为通用集成运放 LM741 或者 $\mu A741$, 其引脚及引脚功能如图 6-1 所示。2 脚为运放的反相输入端, 3 脚为运放的同相输入端, 6 脚为运放的输出端, 7 脚为正电源引脚, 4 脚为负电源引脚。1 脚和 5 脚为输出调零端, 8 脚为空脚。

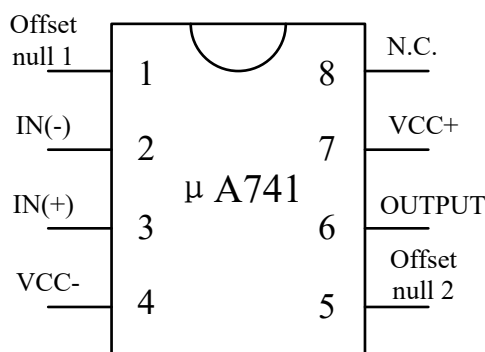


图 6-1 $\mu A741$ 的引脚排列及引脚功能

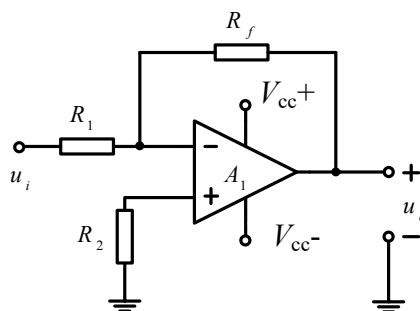


图 6-2 反相比例运算电路

1. 反相比例运算电路

信号由反相输入, 其运算电路如图 6-2 所示, 在理想条件下, 闭环电压放大倍数为 $A_{uf} = -R_f/R_1$ 。增益要求确定后, R_f 和 R_1 的比值即确定, 当 $R_f = R_1$ 时, 放大器的输出电压等于输入电压的负值, 此时它具有反相跟随的作用, 称之为反相器。

2. 同相比例运算电路

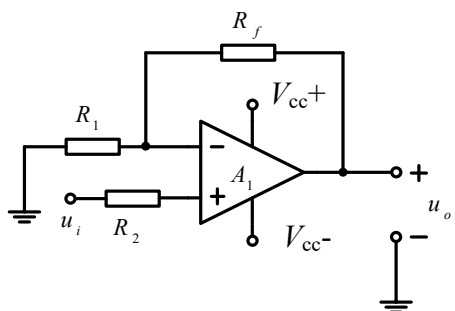


图 6-3 同相比例运算电路

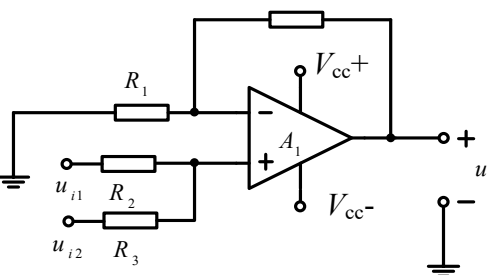


图 6-4 同相加法运算电路

信号由同相端输入, 其运算电路如图 6-3 所示, 在理想条件下, 闭环电压放大倍数为 $A_{uf} = 1 + R_f/R_1$, 当

R_f 为有限值时，放大器增益恒大于 1。当 R_1 断开时或 R_f 为零时，同相比例运算电路具有同相跟随作用，称之为电压跟随器。电压跟随器具有输入阻抗高，输出阻抗低的特点，具有阻抗变换的作用，常用来做缓冲或隔离级。

3. 加法运算电路

根据信号输入端的不同有同相加法电路和反相加法电路两种形式。其运算电路如图 6-4 和图 6-5 所示。

同相加法运算电路的输出电压为

$$u_o = (1 + \frac{R_f}{R}) \times R_p \times (\frac{u_{i1}}{R_2} + \frac{u_{i2}}{R_3})$$

其中， $R_3 = R_1 // R_2 // R_f$ ， $R_p = R_2 // R_3$

因此， R_p 与每个回路电阻均有关，要满足一定的比例关系，调节不便。

反相加法运算电路的输出电压为

$$u_o = -(\frac{R_f}{R_1} u_{i1} + \frac{R_f}{R_2} u_{i2})$$

当 $R_1 = R_2 = R_f$ 时， $u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$

4. 减法运算电路

减法运算电路实际上是反相比例运算电路和同相比例运算电路的组合，其运算电路如图 6-6 所示。在理想条件下，输出电压与各输入电压的关系为：

$$u_o = (1 + \frac{R_f}{R_1}) (\frac{R_3}{R_2 + R_3}) u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

当 $R_1 = R_2$ 和 $R_f = R_3$ 时，则上式为：

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1})$$

图 6-6 减法运算电路

5. 积分运算电路

同相输入和反相输入可以构成积分运算电路，在此以反相积分为例，其运算电路如图 6-7 所示。在理想条件下，输出电压与输入电压的关系为

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i(t) dt$$

即输出电压的大小与输入电压对时间的积分值成正比关系，这个比值由电阻 R_1 和电容 C 决定，时间常数 $R_1 C$ 的数值愈大，达到给定的输出值所需要的时间就愈长，式中的负号表示输出与输入电压的反相关系。

1) 当输入信号为一直流电压 U 时，积分电路的输出电压为 $u_o(t) = -(U / R_1 C)t$ 。输出电路为斜坡电压，但其输出电压值不会无限制的增加，当输出达到饱和时就不再增加，显然， $R_1 C$ 的数值愈大，达到饱和所需的时间就愈长。

2) 当输入信号为方波电压时，积分电路的输出电压为

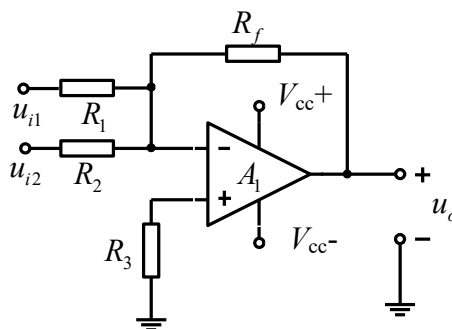
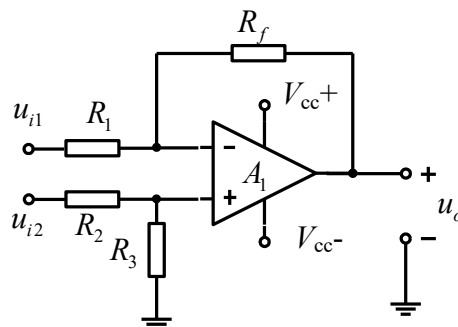


图 6-5 反相加法运算电路



$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^{T/2} u_i(t) dt$$

输出为三角波，为了使三角波的幅度满足要求，要注意时间常数 $R_1 C$ 的选择： $R_1 C$ 值过大，在一定的积分时间内，输出电压会过低，无法满足输出幅度的要求； $R_1 C$ 值过小，积分电路的输出会在未达到积分时间要求时就饱和了。

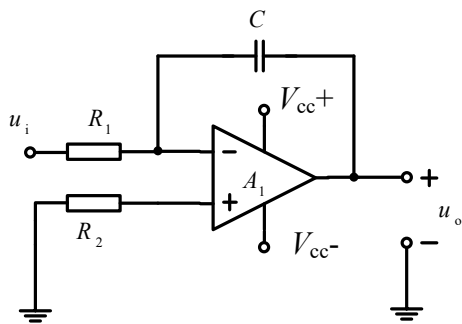


图 6-7 积分运算电路

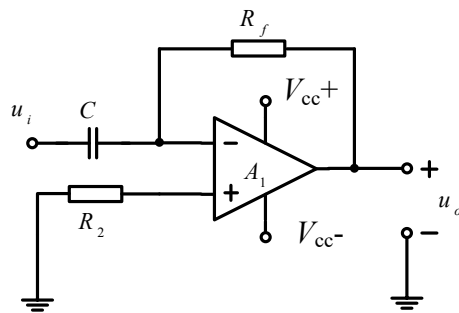


图 6-8 微分运算电路

6. 微分运算电路

微分运算是积分运算的逆运算，只需将反相输入端的电阻和反馈电容调换位置，就称为微分运算电路，其运算电路如图 6-8 所示。

在理想条件下，输出电压与输入电压的关系为

$$u_o(t) = -R_f C \frac{du_i(t)}{dt}$$

6.4.2 运算放大器的非线性应用

当集成运算放大器工作在开环或引入正反馈时，输出电压将超出运算放大器输出电压的范围，其输出电压 u_o 与其输入电压 $u_i = u_+ - u_-$ 之间将不再符合线性关系，即

$$u_o \neq A_{uo}(u_+ - u_-)$$

这是由于集成运算放大器工作在开环或正反馈的工作状态，即使输入加入一微小信号电压，也足以使得输出达到饱和（小于并接近正或负电源电压）。其关系为

$$u_+ > u_-, u_o = +U_{OM}$$

$$u_- > u_+, u_o = -U_{OM}$$

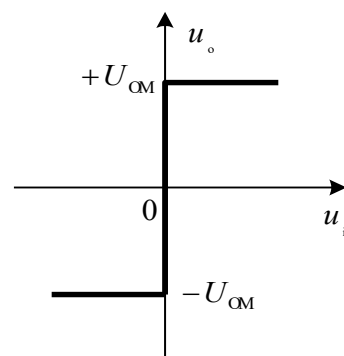


图 6-9 电压传输特性曲线

由上式可得出运算放大器非线性应用时的电压传输特性曲线，如图 6-9 所示。

电压比较器是集成运算放大器非线性应用的基础，是对电压幅值进行比较的电路。它将一个模拟量电压信号和一个参考电压相比较，在两者幅度相等的附近，输出电压将产生跃变，响应输出高电压或低电平。比较器可以应用于模拟与数字信号转换等领域，它的一个基本应用就是组成非正弦波形变换电路。

图 6-10 所示为一个最简单的电压比较器， U_R 为参考电压，加在运放的同相输入端，输入电压 u_i 加在反向输入端。

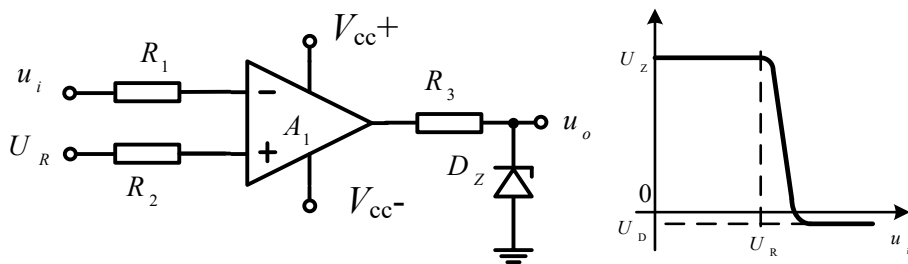


图 6-10 电压比较器电路和传输特性

当 $U_i < U_R$ 时，运放输出高电平，稳压管 D_Z 反向稳压工作。输出端电位被其钳位在稳压管的稳定电压 U_Z ，即 $u_o = U_Z$ 。

当 $U_i > U_R$ 时，运放输出低电平，稳压管 D_Z 正向导通工作。输出电压等于稳压管的正向压降 U_D ，即 $u_o = -U_D$ 。

因此，以 U_R 为界，当输入电压 U_i 变化时，输出端反映出两种状态，高电位和低电位。注意：在应用比较器时，输入电压 U_i ，参考电压 U_R ，都应该在电源电压的范围内。

常用的电压比较器有过零比较器、滞回比较器、窗口比较器等。

6.5 实验步骤

以下所有电路都要使用直流稳压电源的两路电压，向集成运放提供 $\pm 15V$ 的工作电压。

注意事项：

- 1、集成运放芯片的电源为正负对称电源，不可把正、负电源极性接反或将输出端短路，否则会烧坏芯片。
- 2、每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
- 3、在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

1. 反相比例放大电路

分析电路的工作原理，理论计算数据填入表 6-2。

- ① 选择元器件，按图 6-11 接线，接通直流工作电源 $\pm 15V$ 。
- ② 输入信号是表 6-2 中给定的输入直流电压信号，用万用表直流电压档测量输出电压，记录数据，填入表 6-2 中。
- ③ 输入信号是正弦波，其频率为 $1kHz$ 。有效值分别为 $0.5V$ ， $1V$ 。接通信号源，用交流毫伏表分别测量，当输入电压的有效值分别是 $0.5V$ ， $1V$ 时输出电压的有效值，填入表 6-2 中。
- ④ 用示波器观察输入电压和输出电压的波形，并记录 u_i 和 u_o 波形，要求体现相位关系，并标出各自峰值，测量交流放大倍数，并将测量值与计算值进行对比验证。

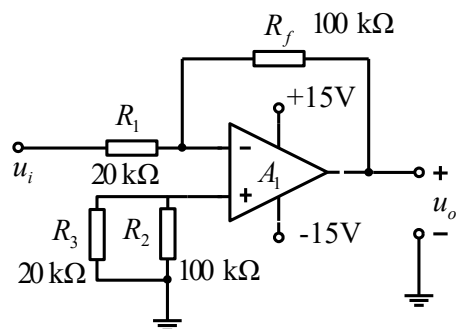


图 6-11 反相比例放大电路

表 6-2 反相比例放大电路测试数据表格

直流信号源 U_i/V	-0.4	0.4	0.6	0.8
U_i/V 测试值				
U_o/V 输出电压				
直流放大倍数				

u_i 的有效值 /V	输出电压计算值 /V	实测值 U_o	交流放大倍数	输入电压和输出电压的波形
0.5V				
1V				

2. 同相比例放大电路

分析电路的工作原理，理论计算数据填入表 6-3。

- ① 选择元器件，按图 6-12 接线，接通直流工作电源±15V。
- ② 输入信号是正弦波，其频率为 1kHz。有效值分别为 0.5V，1V。
- ③ 接通信号源，用交流毫伏表分别测量，当输入电压的有效值分别是 0.5V，1V，2V 时输出电压的有效值，填入表 6-3 中。
- ④ 用示波器观察 u_i 和 u_o 波形，并记录波形。
- ⑤ 分析输入 2V 时，输出波形变化的原因。

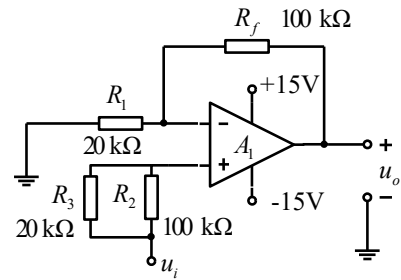


图 6-12 同相比例放大电路

表 6-3 同相比例放大电路测试数据表格

输入电压有效值	0.5V	1V	2V
理论计算值 U_o			
实测值 U_o			
误差			

3. 减法器电路

结合实验室现有的器件，按照以下的关系式设计一个减法器，即

$$u_o = 10(u_{i2} - u_{i1}), \quad R_f = 100\text{k}\Omega$$

实验步骤如下：

- ① 实验电路经过老师检查才能接线。接通直流±15V 电源。
画出实验电路图：（建议采用 10k 以上的电阻，请思考原因）
- ② 输入信号是正弦波，其频率为 1kHz，有效值如表 6-4，要求两个输入信号同相位。
- ③ 接通信号源，用交流毫伏表或者 Fluke 287C 测量输出电压的有效值，填入表 6-4 中。
- ④ 用示波器观察输入电压 u_{i2} 和 u_o 的波形，并记录波形。

表 6-4 减法运算电路

有效值 U_{i1}	有效值 U_{i2}	测量值 U_{i1}	测量值 U_{i2}	有效值 U_o (测量)	有效值 U_o (理论)	误差
0.5V	1V					
0.5V	1.2V					

4. 加法器电路

结合实验室现有的器件，按照以下的关系式设计一个反相加法运算电路，即

$$u_o = -2(u_{i1} + u_{i2}), \quad R_f = 20\text{k}\Omega$$

实验步骤如下：

- ① 实验电路经过老师检查才能接线。接通直流±15V 电源。
画出实验电路图：（建议采用 10k 以上的电阻，请思考原因）
- ② 输入信号是直流信号源，幅值见表 6-5。

③ 接通信号源，用万用表直流电压档测量输出电压，填入表 6-5 中。

表 6-5 反相加法运算电路

直流信号源 U_{i1}/V	直流信号源 U_{i2}/V	U_o (测量) /V	U_o (理论) /V	误差
2V	0.5V			
2V	1V			

5. 电压跟随器电路

分析电路的工作原理，理论计算数据填入表 6-6。

- ① 选择元器件，按图 6-13 接线，接通直流工作电源 $\pm 15V$ 。
- ② 调整信号发生器的输出，使得输入信号为直流电压叠加 1kHz 正弦波，1V 直流电压叠加 0.3V 峰峰值正弦波。
- ③ 接通信号源，测试不同条件下的输出电压直流分量和交流分量的峰峰值。填入表 6-6 中。
- ④ 用示波器观察输入电压和输出电压的波形，并记录波形。
- ⑤ 分析负载不同时， R_L 开路 and $R_L=50\Omega$ 时，输出电压的影响。

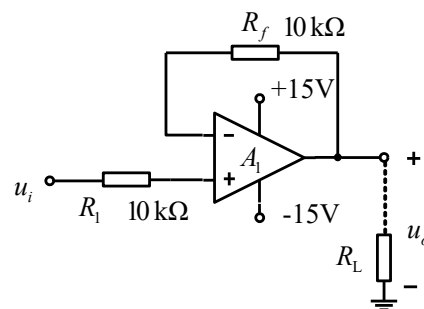


图 6-13 电压跟随器电路

表 6-6 电压跟随器电路测试数据表

测试条件	$R_i=10k\Omega$ $R_f=10k\Omega$ R_L 开路		$R_i=10k\Omega$ $R_f=10k\Omega$ $R_L=50\Omega$	
	直流分量	交流分量	直流分量	交流分量
理论计算值 U_o				
实测值 U_o				
误差				

6. 积分电路

实验所用的积分电路如图 6-14 所示，在积分电容上并联一个电阻，目的是为了降低电路的低频电压增益，从而消除积分电路的饱和现象。

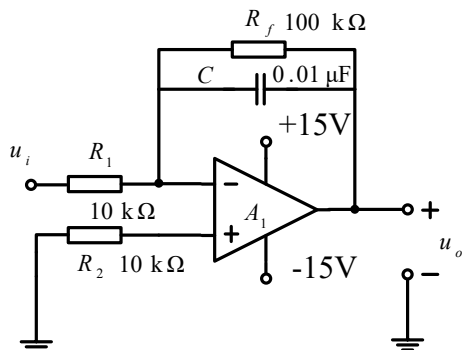


图 6-14 实际的积分电路

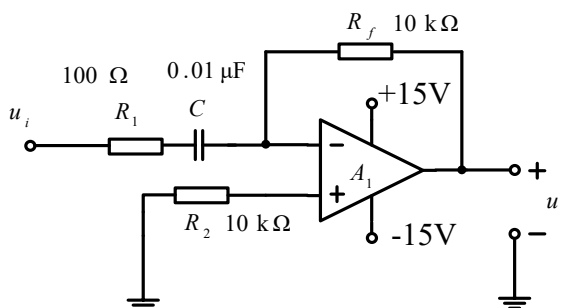


图 6-15 实际的微分电路

- ① 按照图 6-14 的电路推导出 u_o 的表达式。
- ② 按上面电路图要求选择电路元件，接好电路。
- ③ 调节函数信号发生器，使之输出频率为 1kHz，峰峰值为 2V 的方波（幅值为 $\pm 1V$ ），作为电路的输入电

压 u_i 。

- ④ 检查后，接通 $\pm 15\text{V}$ 电源。
- ⑤ 记录输入电压和输出电压的波形。
- ⑥ 将电容更改为 $0.1\mu\text{F}$ ，观察输出波形的变化，并说明波形变化的原因。

7. 微分电路

实际微分电路如图 6-15 所示。由于电容 C 的容抗随输入信号的频率升高而减小，因此输出电压随频率升高而增加，为限制电路的高频增益，在输入端与电容 C 之间加入一个小电阻。

- ① 按图 6-15 的电路，推导出 u_o 的表达式。
- ② 按上面电路图要求选择电路元件，接好电路。
- ③ 调节函数信号发生器，使之输出频率为 1kHz ，峰峰值为 2V 的三角波，作为电路的输入电压 u_i 。
- ④ 检查后，接通 $\pm 15\text{V}$ 电源。
- ⑤ 记录输入电压和输出电压的波形。
- ⑥ 将电容更改为 $0.1\mu\text{F}$ ，观察输出波形的变化，并说明波形变化的原因。

8. 电压过零比较器电路

过零电压比较器如图 6-16 所示。

- ① 按图 6-16 接线。
- ② 输入 u_i 为正弦波信号，其有效值为 1V ，频率为 1kHz 。
- ③ 接通直流电源 $\pm 15\text{V}$ 。
- ④ 用示波器观察输出电压波形，并将输入波形、输出波形画在下图中。
- ⑤ 在输入电压过零处展开，观察输出波形的变化斜率，时间等参数，并思考输出波形翻转斜率和运放的哪个参数有关？
- ⑥ 使用示波器的 XY 显示功能，查看李萨如图形，在下图中画出电压传输特性。

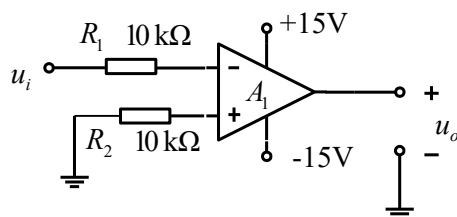
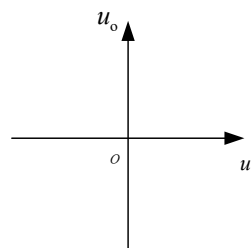
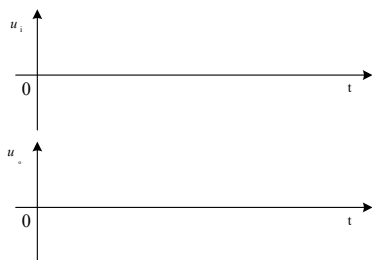


图 6-16 过零比较器电路图



9. 滞回比较器电路

滞回比较器如图 6-17 所示。

- ① 按图 6-17 接线。
- ② 输入 u_i 为三角波信号，其幅值为 $\pm 5\text{V}$ ，频率为 1kHz 。
- ③ 接通直流电源 $\pm 15\text{V}$ 。
- ④ 按照表 6-7 要求，改变直流信号源输入 U 端，用示波器测量输出电压 u_o 的矩形波波形，如图 6-18 所示。
- ⑤ 按照表 6-7 要求，改变直流信号源输入 U 端，用示波器测量输出电压 u_o 的矩形波波形的变换，测量 T 和 T_H 的数值。

- ⑥ 用示波器观察输出矩形波波形的变化，测量输出电压 u_o 由负电压跃变为正电压时的 u_i 瞬时值 u_{i+} 和 u_o 由正电压跃变为负电压时 u_i 瞬时值 u_{i-} ，记入表 6-7，并记录 $U=0V$ 时， u_i 和 u_o 的波形。

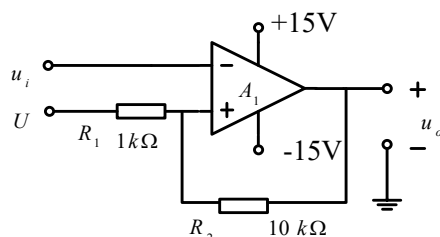


图 6-17 滞回比较器电路图

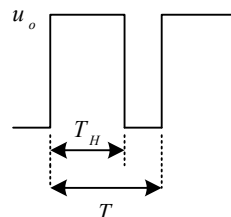


图 6-18 输出电压波形

表 6-7 滞回比较器的测量

U/V	测量值				计算值
	$T/\mu s$	$T_H/\mu s$	u_{i+}/V	u_{i-}/V	$d = \frac{T_H}{T}$
-3					
-1					
0					
2					
3.5					

10. 反相滞回比较器电路

滞回比较器如图 6-19 所示。

- ① 按图 6-19 接线， D_z 为 6.2V 双向稳压管 2DW231，接通直流电源。
- ② 输入 u_i 接直流信号源，改变直流电压信号，测出输出电压 u_o 由正电压跃变为负电压时 u_i 的临界值。
- ③ 测出 u_o 由负电压跃变为正电压时 u_i 的临界值。
- ④ u_i 接频率为 1kHz，峰峰值为 4V 正弦信号，观察并记录输入 u_i 和输出 u_o 的波形
- ⑤ 增加 u_i 的幅值，并用示波器的 X-Y 方式显示，测量并记录传输特性曲线。（对比一组波形即可）
- ⑥ 将电阻 R_F 由 100kΩ 改为 200kΩ，重复测量并记录传输特性曲线，说明滞回特性曲线和元件值之间的关系。（对比一组波形即可）

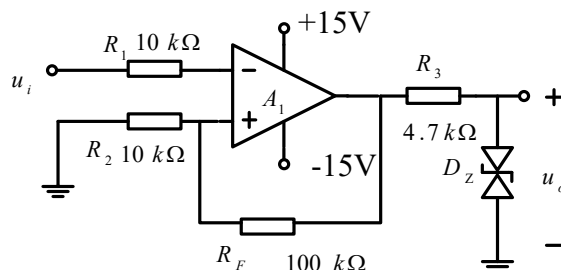


图 6-19 反相滞回比较器电路

11.* (选做) 运算放大器的参数 (V_{om} VS f_s)

采用运放 LM741 或者 $\mu A741$ ，搭建反相比例放大电路，如图 6-11。使函数发生器输出正弦波有效值为 1V，变化输入信号的频率为 1kHz，10kHz，20kHz，用示波器的 measure 功能，测试输出电压的有效值，填入表 6-8 中。变化输入电压的有效值为 0.2V，测试频率为 20kHz，50kHz，100kHz 时的输出波形有效值，并同时监测输入电压和输出电压波形。

计算出放大倍数，观察波形的形状、相位的变化，并分析①，②，③，④波形产生的原因。将运放更改为 TL071CP，搭建反相比例放大电路，如图 6-11。使函数发生器输出正弦波有效值为 0.2V，变化输入信号的频率为 20kHz，50kHz，100kHz，用示波器的 measure 功能，测试输出电压的有效值，填入表

6-9 中, 然后更改输入电压为 1V 有效值, 频率为 100kHz, 测试输出电压的有效值, 填入表 6-9 中, 并同时监测输入电压和输出电压波形。

计算出放大倍数, 观察波形的形状、相位的变化, 并对比采用 $\mu\text{A}741$ 的放大电路的特性, 分析⑤, ⑥波形产生的原因。

表 6-8 采用 $\mu\text{A}741$ 反相比例放大电路频率变化测试

u_i 有效值	u_i 频率	u_o 有效值	u_o 频率	放大倍数	波形
1V	1kHz				需要记录为①号波形
1V	10kHz				
1V	20kHz				需要记录为②号波形
0.2V	20kHz				需要记录为③号波形
0.2V	50kHz				
0.2V	100kHz				需要记录为④号波形

表 6-9 采用 TL071CP 反相比例放大电路频率变化测试

u_i 有效值	u_i 频率	u_o 有效值	u_o 频率	放大倍数	波形
0.2V	20kHz				
0.2V	50kHz				
0.2V	100kHz				需要记录为⑤号波形
1V	100kHz				需要记录为⑥号波形

采用 TL071CP, 搭建过零比较器电路, 如图 6-16 所示, 重复步骤 8 的操作, 然后:

- ① 用示波器观察输出电压波形, 并将输入波形、输出波形画在下图中。
- ② 在输入电压过零处展开, 观察输出波形的变化斜率, 时间等参数, 并对比采用 $\mu\text{A}741$ 时的波形, 是否相同, 并分析思考输出波形翻转斜率和运放的哪个参数有关, 并对比两个运放的参数差异?

6.6 实验注意事项

1. 集成运放芯片的电源为正负对称电源, 不可把正、负电源极性接反或将输出端短路, 否则会烧坏芯片。
2. 每次更换电路时, 必须首先断开电源, 严禁带电操作。
3. 在电路工作中, 如果发现波形不对, 或者异常声音或者异常发热, 需要马上断电, 检查电路。
4. 进行选做步骤 8 时, 更换芯片时, 要在老师的指导下, 使用镊子, 更换运放, 动作要精准、轻, 注意手不要碰到芯片的管脚, 防止静电损伤。

6.7 故障分析与检查排除

参考实验一 1.7。

6.8 实验思考题

1. 电阻、电容本身就可组成积分器, 为什么还要用运算放大器。
2. 反相比例放大器和同相比例放大器的输出电阻, 输入电阻各有什么特点? 试用负反馈概念解释之。
3. 在实际测试中, 如果发现运算放大器的输出电压与理论值相差很多, 接近电源的负电源电压, 是什么原因造成的。

实验七 波形发生电路

7.1 实验目的

1. 掌握利用运算放大器设计方波发生器、矩形波发生器、三角波发生器、锯齿波发生器的方法；
2. 掌握利用运算放大器的正反馈原理设计各种波形发生电路的方法；

7.2 实验预习要求

1. 复习运用集成运算放大器，加入反馈网络，利用正反馈原理，满足振荡条件，构成各类波形发生电路的原理。
2. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项，预习实验中使用到的波形发生电路的工作原理和使用方法；
3. 完成实验步骤中理论数据的计算；
4. 使用 ORCAD 的 PSPICE 软件仿真搭建实验中所用的各类波形发生电路，将仿真电路图和仿真结果，填入实验报告中；或单独做成一份 word 文档打印出来作为预习报告。

7.3 实验仪器与器件

表 7-1 实验仪器和器件表

	名称	数量	型号
1	线性直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke 287C
3	示波器	1 台	Tek MSO2012B
4	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
5	二极管	3 只	1N4007×2
6	电阻	4 只	2kΩ×2 100kΩ×2
7	电位器	2 只	100kΩ×2
8	电容	2 只	0.01μF×1 0.1μF×1
9	集成运放	2 只	LM741×2 或 μA741×2
10	双向稳压管	1 只	2DW231 (6.2V×1)
11	二极管	2 只	1N4007×2
12	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
13	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

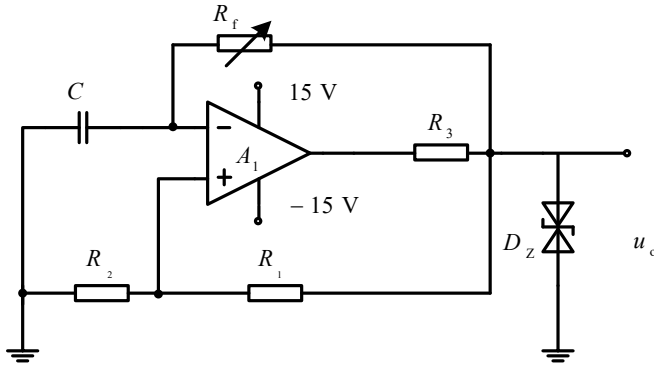
7.4 实验原理

在通信、自动控制和计算机技术等领域中都广泛采用各种类型的波形发生电路，常用的波形有正弦波、矩形波（方波）、三角波和锯齿波。

集成运算放大器是一种高增益的放大器，只要加入适当的反馈网络，利用正反馈原理，满足振荡的条

件，就可以构成正弦波、方波、三角波和锯齿波等各种振荡电路。但由于受集成运放带宽的限制，其产生的信号频率一般都是低频范围。

7.4.1 方波发生器电路



方波发生器电路如图 7-1 所示，其中 D_Z 为双向稳压管。

运算放大器作滞回比较用， D_Z 为双向稳压管，使得输出电压的幅度被限制在 $+U_Z$ 或 $-U_Z$ ； R_1 和 R_2 构成正反馈电路， R_2 上的反馈电压 U_R 是输出电压幅度的一部分，即

$$U_R = \pm \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z$$

加在同相端，作为参考电压， R_f 和 C 构成负反馈电路， u_c 加在反向输入端， u_c 和 U_R 相比较后决定 u_o 的极性。

图 7-1 方波发生器电路

图 7-1 方波发生器电路

当电路工作稳定后，当 u_o 为 $+U_Z$ 时， U_R 也为正值；这时 $u_c < U_R$ ， u_o 通过 R_f 对电容 C 充电， u_c 增长到等于 U_R 时， u_o 由 $+U_Z$ 变为 $-U_Z$ ， U_R 也变为负值。电容 C 开始通过 R_f 放电，而后反向充电。当充电到 u_c 等于 $-U_R$ 时， u_o 由 $-U_Z$ 变为 $+U_Z$ ，如此周期性循环变化，在输出端得到的是方波电压，在电容两端产生的是三角波电压。方波周期为

$$T = 2R_f C \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

通过改变电容 C 的充电和放电时间常数，即可实现占空比可调的方波发生电路。

7.4.2 三角波发生器电路

三角波发生器电路如图 7-2 所示。由滞回比较器和积分器闭环组合而成，积分器 A_2 的输出反馈给滞回比较器 A_1 ，作为滞回比较器的输入。

电路工作稳定后，当 $u_{o1} = +U_Z$ 时，运放 A_1 同相输入端的电压为

$$u_{+1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o$$

积分电容 C 充电，同时， u_o 按线性规律下降，同时拉动运放 A_1 的同相输入端电位下降，当运放 A_1 的同相输入端电位略低于反向端电位（0V）时， u_{o1} 从 $+U_Z$ 变成 $-U_Z$ 。当 $u_{o1} = -U_Z$ 时， A_1 同相输入端的电压为

$$u_{+1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-U_Z) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_o$$

积分电容 C 开始放电， u_o 按线性规律上升，同时拉动运放 A_1 的同相输入端电位上升，当运放 A_1 的同相输入端略大于 0 时， u_{o1} 从 $-U_Z$ 变成 $+U_Z$ 。如此周期性变化， A_1 输出端的是矩形波电压 u_{o1} ， A_2 输出的是三角波电压 u_o 。

当输出达到正向峰值 U_{om} 时，此时 $u_{o1} = -U_Z$ ， A_1 的同相输入端 $u_{+1} = 0V$ ，所以有

$$u_{+1} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}U_Z + \frac{R_2}{R_1 + R_2}u_o = 0$$

则正向峰值为 $U_{om} = \frac{R_1}{R_2}U_Z$ ，同理负向峰值 $-U_{om} = \frac{R_1}{R_2}U_Z$ 。

振荡周期为

$$T = 4R_4C \frac{U_{om}}{U_Z} = \frac{4R_4R_1C}{R_2}$$

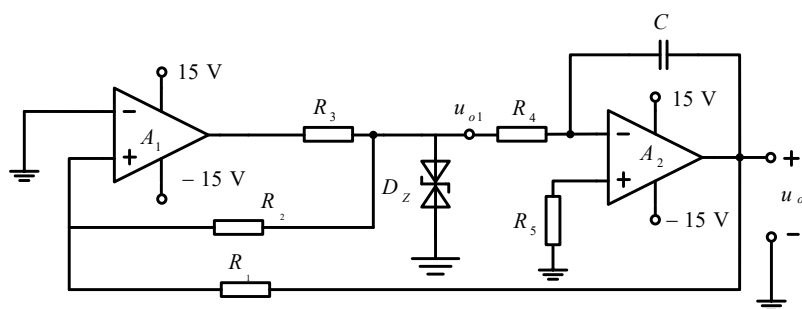


图 7-2 三角波发生器电路

7.5 实验步骤

注意事项：

1. 集成运放芯片的电源为正负对称电源，不可把正、负电源极性接反或将输出端短路，否则会烧坏芯片。
2. 每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
3. 在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

1. 方波发生电路

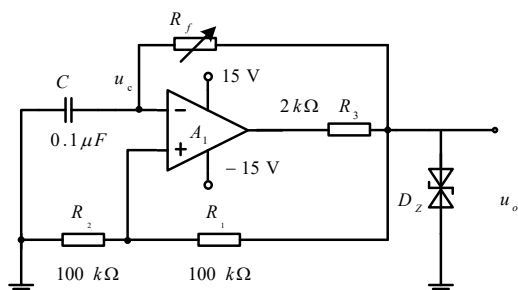



图 7-3 方波发生器实验电路图

测出 $R_f=10k\Omega$ ，以及 $R_f=100k\Omega$ 的 u_o 的频率、周期时间、幅值、占空比，并记录 $R_f=10k\Omega$ 时的输出波形。

选择元器件，按图 7-3 接线，构成方波发生电路，运放使用 LM741 或者 $\mu A741$ ，采用 +15V 和 -15V 供电， D_Z 为双向稳压管 2DW231。

- ① 分析图 7-3 的工作原理，请理论推导出 u_o 的幅值 U_{om} ，并填入表 7-2 中：
- ② 请理论计算，分别求出 $R_f=10k\Omega$ ， $R_f=100k\Omega$ 的 u_o 的周期时间 T_1 和 T_2 ，并填入表 7-2 中
- ③ 用示波器探头观测电压 u_o 和 u_c 的波形，分别

表 7-2 方波发生器实验数据记录表

输出电压参数	计算周期	计算幅值	频率	周期	幅值	占空比	$R_f=10k\ \Omega$ 的输出电压波形
$R_f=10k\ \Omega$							
$R_f=100k\ \Omega$							

2. 占空比可调的矩形波发生电路

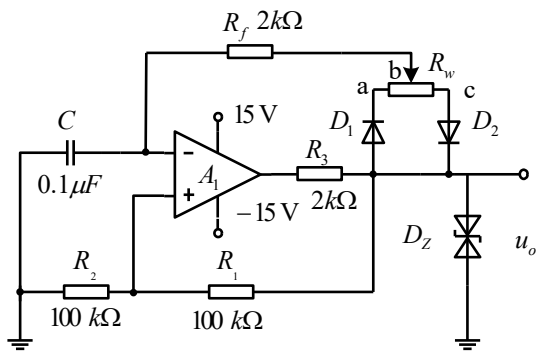
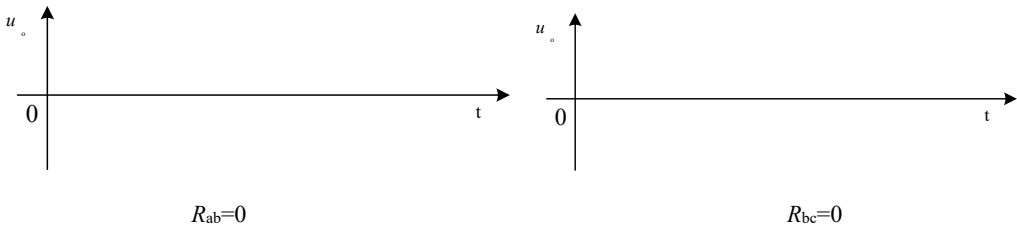


图 7-4 可调占空比矩形波发生器电路图 ($d = \frac{T_H}{T}$)

图 7-4 为可调占空比矩形波发生器电路图，其中 D_1 和 D_2 为二极管 1N4007， R_w 为 $100\ k\Omega$ 电位器。运放使用 LM741 或者 $\mu A741$ ，采用 +15V 和 -15V 供电。 D_Z 为双向稳压管 2DW231。

- ① 电位器 R_w 动端 b 点与 a 点电阻为 0 时，用示波器观察并记录输出电压 u_o 的波形，需要测试出 u_o 的频率、周期、幅值、占空比(d)。
- ② 电位器 R_w 动端 b 点与 c 点电阻为 0 时，用示波器观察并记录电压 u_o 和 u_c 的波形，要测试出 u_o 的频率、周期、幅值、占空比(d)。



③ 测试图 7-4 电路的波形参数：

表 7-3 占空比可调矩形波发生电路测试表格

幅值 U_{om}/V	周期 T	调整电位器 R_w 时，周期时间 T 是否变化	一个周期内， u_o 大于 0 的时间 T_1 的可调范围：

3. 三角波发生电路

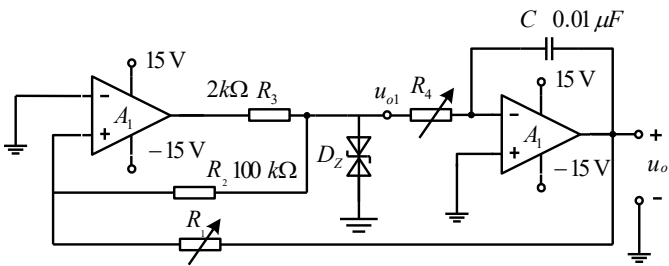


图 7-5 三角波发生器实验电路图

如图 7-5 所示，选择元器件，构成三角波发生电路，其中 R_1 为 $100\ k\Omega$ 电位器， R_4 为 $220\ k\Omega$ 电位器，运放 A_1 和 A_2 使用 LM741 或者 $\mu A741$ ，采用 +15V 和 -15V 供电。

- ① 分析图 7-5 的电路工作原理，回答下面问题：运放 A_1 和 A_2 是否工作在线性范围内？为什么？

- ② 要求 u_o 的幅值为 $\pm 1V$ ，周期时间为 $1ms$ ，理论计算出 R_1 和 R_4 的电阻值各为多少？

$$R_1 = \quad R_4 =$$

- ③ 取上述计算的 R_1 和 R_4 的电阻，验证理论计算结果是否正确。并用示波器探头检测 u_{o1} 和 u_o 的波形，并在同一个时序下，画出两电压波形。要求测出 u_{o1} 的频率、占空比以及 u_o 的周期、有效值。

4. 锯齿波发生电路

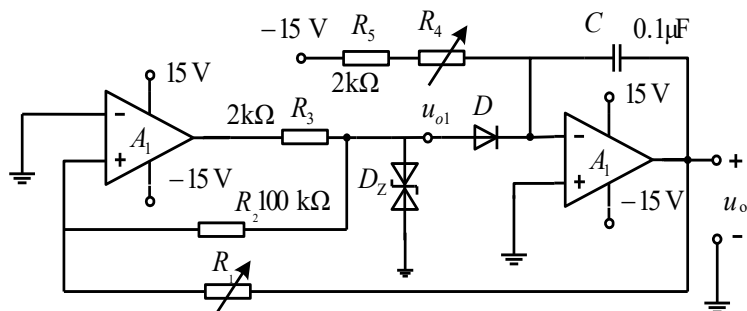


图 7-6 锯齿波发生器实验电路图

如图 7-6 所示，选择元器件，构成锯齿波发生电路，其中 R_1 和 R_4 为 $200\text{ k}\Omega$ 电位器，二极管 D 为 1N4007，运放 A_1 和 A_2 使用 LM741 或者 $\mu A741$ ，采用 $+15V$ 和 $-15V$ 供电。

- ① 分析图 7-6 的锯齿波发生电路的工作原理，电容 C 的充电回路和放电回路各是什么？充电和放电的时间常数是否相同？

- ② 将电阻 R_4 所接的电源为 $-15V$ ，为获得 u_o 的峰峰值为 $2V$ （即 $\pm 1V$ ），周期时间为 $1ms$ 的锯齿波，理论计算出 R_4 和 R_1 的大小： $R_1 = R_4 =$
- ③ 调节电位器 R_4 和 R_1 使得达到前面的理论计算值，然后将电位器接入电路，使得输出 u_o 的峰峰值为 $2V$ （即 $\pm 1V$ ），周期时间为 $1ms$ 的锯齿波。并在同一时序下，记录 u_{o1} 和 u_o 电压波形。要求测出 u_{o1} 的频率、占空比以及 u_o 的周期、幅值。
- ④ 保持电位器不变，将电阻 R_4 所接的电源更改为 $+15V$ ，并将二极管 D 反接，并观察 u_{o1} 和 u_o 的波形变化，并在同一时序下，记录波形，要求测出 u_{o1} 的频率、占空比以及 u_o 的周期、幅值。

5. RC 桥式正弦波振荡电路

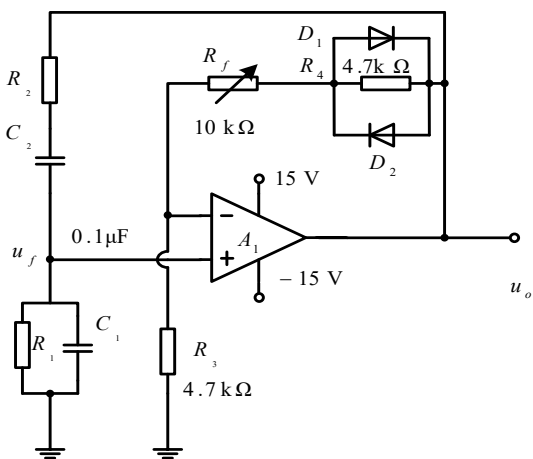


图 7-7 RC 桥式正弦波振荡电路

按图 7-7 接好电路，其中 $R_1 = R_2 = R_f = 10\text{ k}\Omega$ ， $C_1 = C_2 = C = 0.01\mu\text{F}$ 。

振荡电路调整：开启 $+15V$ 和 $-15V$ 直流稳压电源给运放 A_1 供电，将示波器调至适当的档位后接至输出端 u_o 处，观察振荡电路输出端 u_o 的波形。若无正弦波输出，可缓慢调节 R_f ，使得电路产生振荡，观察电路输出波形的变化，解释所观察到的现象。然后仔细调节 R_f ，使电路输出较好的基本不失真的正弦波形，进行测量。

- ① 正反馈系数 $|F|$ 的测定。将示波器的两个通道分别接 u_o 和 u_f 端，仔细调节 R_f ，在确保两个通道的正弦波不失真的前提下，将输出幅度调的尽量大些，测量 u_o 的峰峰值 U_{opp} 和 u_f 的峰峰值 U_{fpp} ，计算 $|F| = U_{fpp}/U_{opp}$ 。

- ② 振荡频率 f_o 的测量。
- ③ 将示波器的两个通道显示的 u_o 和 u_f 的波形画在同一坐标系中，要求体现两个波形之间的相位关系，填入表 7-3。

结合上面的实验结果，根据理论知识，分析 RC 不同取值对振荡频率 f_o 的影响。

表 7-3 RC 桥式正弦波振荡电路测试表格

	U_{opp}	U_{fpp}	$ F $	f_o	u_o 和 u_f 的波形
$R=10\text{ k}\Omega$					
$R=20\text{ k}\Omega$					

李萨如图形法测量振荡频率 f_o ：保持上个实验中 $R=20\text{k}\Omega$ 、 $C=0.01\mu\text{F}$ 不变，将 u_o 送入示波器的一个通道，再讲函数信号发生器引出正弦信号送入示波器的另一个通道（输出幅度与 u_o 相同或接近）。按示波器的 acquire 中 X-Y 显示方式。调整函数信号发生器输出频率，使之接近输出限号 u_o 的频率，仔细调整，使屏幕上显示一个稳定的椭圆（或圆）。此时信号发生器指示的频率即为振荡器的输出频率。

6. 设计实验

使用实验室现有的元器件 $\mu\text{A}741$ 等，设计一个波形发生电路，实现以下功能：

- 1) 独立产生幅值为 $\pm 6.2\text{V}$ ，占空比为 50% 的方波电压，频率设计在 $700\text{Hz}\sim 1\text{kHz}$ 之间。
- 2) 然后，将此方波电压转换为一个三角波，幅值为 $\pm 2\text{V}$ 左右

要求：

- ① 画出设计的电路图，说明工作原理；
- ② 写出电路参数的计算过程；
- ③ 搭建出电路，测试方波电压波形和三角波电压波形，并在同一时序下绘制波形图。

7.6 实验注意事项

1. 集成运放芯片的电源为正负对称电源，不可把正、负电源极性接反或将输出端短路，否则会烧坏芯片。
2. 稳压二极管的型号不能选错。
3. 每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
4. 在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

7.7 故障分析与检查排除

参考实验一 1.7。

7.8 实验思考题

1. 方波发生器电路中 C 的数值增大时， f 和占空比 d 是否变化？改变 R_2 是否引起 f 和 d 的变化？为什么？
2. 分析比较三角波发生器和锯齿波发生器的共同特点和区别；
3. 若仿真时选择了 3.3V 的稳压管，实验结果有什么不同？（选择一种类型电路说明）

实验八 直流稳压电路

8.1 实验目的

1. 掌握整流、滤波、稳压电路工作原理及各元件在电路中的作用；
2. 学习掌握交直流电源的安装、调整和测试方法；
3. 熟悉和掌握线性集成稳压电路的工作原理；
4. 学习线性集成稳压电路技术指标的测量方法。

8.2 实验预习要求

1. 复习单相直流电源的组成和各部分作用的原理，包括半波整流电路、全桥整流电路、滤波电路等等。
2. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项，预习实验中使用到的线性集成稳压芯片的工作原理和使用方法；
3. 使用 ORCAD 的 PSPICE 软件仿真获得实验电路的测试数据，将仿真电路图和仿真结果，填入实验报告中，或单独做成一份 word 文档打印出来作为预习报告。

8.3 实验仪器与器件

表 8-1 实验仪器和器件表

	名称	数量	型号
1	单相交流电源	1 台	19500001
2	手持万用表	1 台	Fluke 287C
3	示波器	1 台	Tek MSO2012B
4	线性稳压芯片	2 块	LM317×1, LM7812×1
5	二极管	若干	1N4007×2
6	整流桥	1 只	整流桥模块
7	电容	若干	0.1μF×1 1μF×1 10μF×2 100μF×2
8	电阻	若干	100Ω/0.25W×1 510Ω/0.25W×1
9	电位器	1 只	1kΩ
10	短接桥和连接导线	若干	
11	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

8.4 实验原理

8.4.1 线性直流稳压电源的基本原理

直流电源是电子设备中最基本、最常用的仪器之一。它作为电源，可保证电子设备的正常运行。本节介绍的直流电源为单相小功率直流电源，它将频率为 50Hz，有效值为 220V 的单相交流电压转换为幅值稳

定、输出电流为几安以下的直流电压。这种电源一般由整流电路、滤波电路和稳压电路三部分组成，如图 8-1。

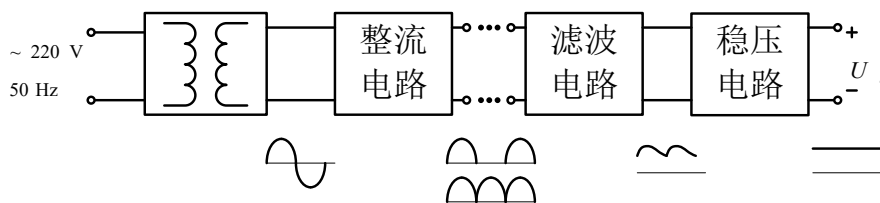


图 8-1 直流稳压电源的功能示意图

整流电路是利用二极管的单相导电性，将交流电转变为脉动的直流电；滤波电路，为了减小电压的脉动，通过低通滤波电路滤波，使得输出电压平滑；稳压电路的作用是保持输出电压的稳定，使输出电压不随电网电压、负载和温度的变化而变化。由于滤波电路为无源电路，所以接入负载后会其滤波效果，在稳定性要求不高的电子电路中，整流、滤波以后的直流电压可以作为供电电源，但在这节中，我们采用直流稳压芯片作为末端的稳压电路。

8.4.2 线性直流稳压电源的稳态性能指标

线性直流稳压电源在稳态工作条件下，技术指标分为两种：特性指标，包括允许的输入电压，输出电压，输出电流及输出电压调节范围等；质量指标，用于衡量电源的稳定程度，包括稳压系数（或电压调整率），输出电阻（或电流调整率），温度系数及纹波电压等。

1) 纹波电压：

纹波电压是指叠加在输出电压 U_o 上的交流分量，利用示波器可观测其峰峰值 ΔU_{OPP} ，也可以用能满足其纹波频率测量的万用表测试其纹波电压有效值、峰峰值等。

2) 稳压系数及输入电压调整率

稳压系数：在负载电流、环境温度不变的情况下，输入电压的相对变化引起输出电压的相对变化，即

$$S_U = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_i / U_i}$$

电压调整率：输入电压相对变化为 $\pm 10\%$ 时的输出电压相对变化量，即

$$K_U = \frac{\Delta U_o}{U_o}$$

稳压系数 S_U 和电压调整率 K_U 均说明输入电压对输出电压的影响，因此只需测试其中之一即可。

3) 输出电阻及电流调整率

输出电阻为输入电压不变时，输出电压变化量与输出电流变化量之比的绝对值，即

$$r_o = \frac{|\Delta U_o|}{|\Delta I_o|}$$

电流调整率：输出电阻从最小到最大值 R_{Lmax} 时所产生的输出电压相对变化值，即：

$$K_I = \frac{\Delta U_o}{U_o}$$

输出电阻 r_o 和电流调整率 K_I 均说明负载电流对输出电压的影响，因此也只需要测试其中之一即可。

需要注意的是，对于电压源来说，输出电阻为 0，则此电压源短路，是极限情况，容易损坏电源，所以测试时要避免这种情况，让电源工作在稳定条件下来测试其稳态的特性。

8.5 实验步骤

注意事项：

- 1、所有标注了极性的电容都为电解电容，接入电路时其+极不能反接。
- 2、每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
- 3、不能用手触碰裸露的导线，防止触电。
- 4、电路工作一段时间后，芯片或者电阻会发热，不要触摸，防止烫伤。
- 5、在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

1. 单相半波整流电路

按图 8-2 接线，图中交流电源为市电输入，输出可以选择多个低压交流电源输出 V_{ac} ：6V，12V，18V。这里选择输出为 12V 交流档，即 V_{in} 有效值为 12V 左右。整流二极管采用 1N4007，输出滤波电容采用电解电容 100 μ F， R_L 为负载电阻 510 Ω 。

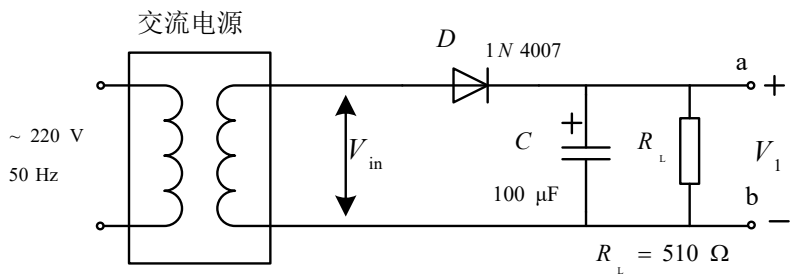






图 8-2 单相半波整流电路

完成下面测试，画出输出电压波形，填入表 8-2。

- ① 去掉整流二极管， D 处短路，滤波电容 C 断开，打开电源，用示波器观察负载电阻 R_L 两端的波形（读出频率、最大值、有效值、平均值），并用万用表直流档测试其电压值。
- ② 断开电源，加上二极管 D ，电容 C 仍保持断路，打开电源，用示波器观测负载电阻 R_L 两端的波形（读出频率、最大值、有效值、平均值），并用万用表直流档测试其电压值。
- ③ 断开电源，在②的基础上，接上电容 C (100 μ F)，打开电源，用示波器观测负载电阻 R_L 两端的波形（读出频率、最大值、有效值、平均值），并用万用表直流档测试其电压值。
- ④ 断开电源，在③的基础上，将 R_L 更换为 100 Ω ，打开电源，用示波器观测负载电阻 R_L 两端的波形（读出频率、最大值、有效值、平均值），并用万用表直流档测试其电压值。
- ⑤ 断开电源，在③基础上，固定 R_L 为 510 Ω ，改变电容 C 为 10 μ F，打开电源，用示波器观测负载电阻 R_L 两端的波形（读出频率、最大值、有效值、平均值），并用万用表直流档测试其电压值。
- ⑥ 断开电源，恢复电路， R_L 为 510 Ω ， C 为 100 μ F，供下面实验使用。

表 8-2 单相半波整流电路测试表格

步骤	R_L 两端电压波形	测试量
①		频率： 最大值： 有效值： 平均值： 万用表直流档测量值：

②		频率： 最大值： 有效值： 平均值： 万用表直流档测量值：
③		频率： 最大值： 有效值： 平均值： 万用表直流档测量值：
④		频率： 最大值： 有效值： 平均值： 万用表直流档测量值：
⑤		频率： 最大值： 有效值： 平均值： 万用表直流档测量值：

2. 三端可调集成稳压器 LM317 组成的直流稳压电路

LM317 的封装有多种形式，如图 8-3 所示：TO-220，ISOWATT220，D²PAK，TO-3 等，管脚分为：输入端、调整端和输出端，如图对应所示。其输出端 PIN3 对调整端 PIN1 的电压为固定的 1.25V 电压不变，下面就是利用这个特性，来设计电源的输出。

图 8-4 为由 LM317 组成的三端可调式集成稳压电路，由于 1.25V 不变，所以输出电压为

$$V_o = (1 + R_p / R_1) \times V_{ref} + I_{ADJ} \times R_p$$

由于 R1 上的电流值基本恒定，而调整端的电流非常小，且恒定，故将其忽略，那么输出电压为 $V_o = (1 + R_p / R_1) \times 1.25V$ 调节调节电位器 R_p 的阻值便可以改变输出电压的大小。

LM317 的输入要求为直流电压：3 V ~ 40V，二极管 D_1 的作用是防止输入短路， D_2 的作用是防止输出短路，保护芯片。

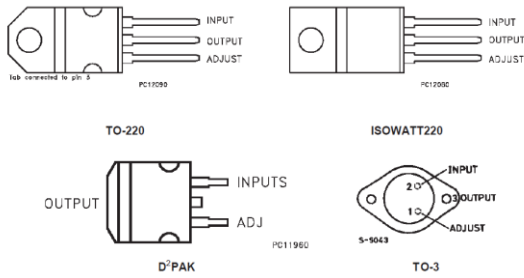


图 8-3 LM317 的封装和管脚对应

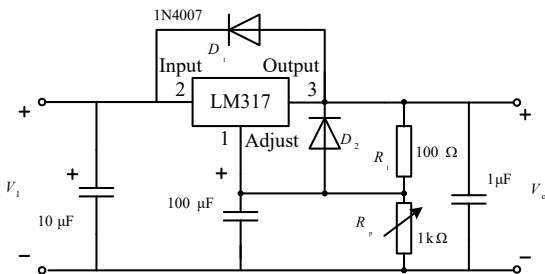


图 8-4 LM317 组成的三端可调式集成稳压电路

将图 8-2 的单相半波整流电路和图 8-4 的 LM317 的三端可调式集成稳压电路连接在一起(在 V_1 处连接), 按图中参数接好电路, 形成一个带稳压芯片的直流电源电路 (如果二极管不够用, 保留 D_2)。交流输入为 V_{in} 有效值为 12V 左右, R_p 调在中间位置, 按下面步骤测试电路。示波器的两个探头分别测试 V_1 和 V_o 的波形。

- ① 调节 R_p , 观察输出电压是否改变。输出电压可调时, 用万用表分别测出 V_o 的最大值和最小值, 以及对应稳压部分的输入电压 V_1 。观察并记录 V_1 和 V_o 的波形的变化, 结合 LM317 的 datasheet, 分析最大输出时, 输出电压不稳定的原因。结果填入表 8-3。
- ② 调节 R_p , 使 V_o 为 6V, 并用万用表, 测出此时 V_1 的值。 $V_1 = \underline{\hspace{2cm}} V$
- ③ 仍使得 V_o 为 6V, 改变输入交流电源的档位, 从 12V 档位变化到 18V 档位输出, 测量输出电压相应的变化值及输入电压相应的变化值, 填入表 8-4 中, 并求直流电源的稳压系数。这里需要用万用表的交流

电压档测试输入电压 V_{in} 有效值。 $S_U = S_U = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_i / V_i}$

表 8-3 LM317 稳压电路测试记录表

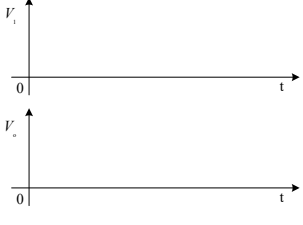
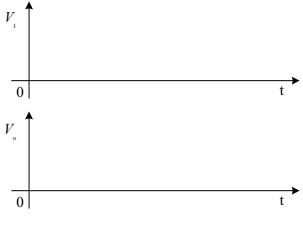
V_o 的最大值	V_o 最大值时 V_1 值	V_o 的最大值时, V_1 和 V_o 的波形	输出电压是否稳定, 原因为:
			答:
V_o 的最小值	V_o 最小值时 V_1 值	V_o 的最小值时, V_1 和 V_o 的波形	
			

表 8-4 LM317 稳压电路稳压系数测试记录表

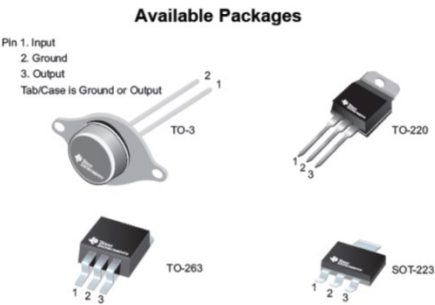
	输入电压 V_{in} 值	输出直流电压 V_o 值
输入 12V 档位时		
输入 18V 档位时		

- ④ 使用电子毫伏表, 观察步骤③中的输出电压中的纹波电压有效值 V_{ow} 。

3. 由 LM7812 组成的直流稳压电路

LM7812 是一款线性集成稳压芯片, 其封装形式如图 8-5 所示, 有 3 个引脚, PIN1 为输入端, PIN2 为接地端, PIN3 为输出端, 外壳用于散热, 在芯片内部是接地或者接输出。LM7812 的输出典型值是 12V, 最大输出电流 1.5A 左右。图 8-5 LM7812 的几种封装

图 8-6 为使用 LM7812 构成的直流稳压电路, 前级的整流电路采用桥式整流电路, 后级由 LM7812 稳压输出。选择元器件, 按下图连线。



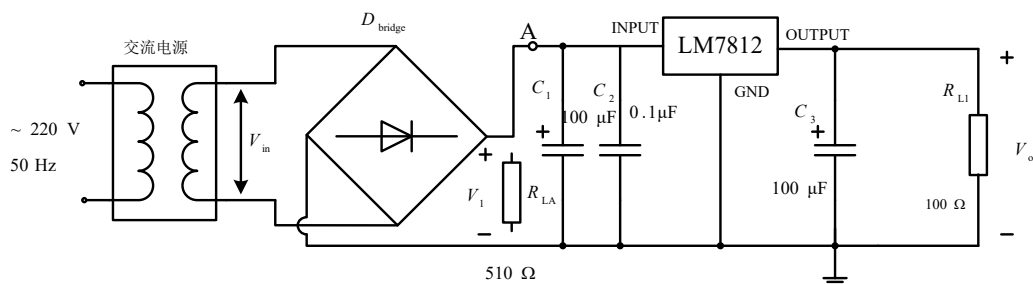


图 8-6 LM7812 组成的直流稳压电路图



① 将上述电路在 A 点处断开，在 A 点和地之间接入电阻 $R_{LA}=510\Omega$ ，输入交流电压 $V_{in}=18V$ ，测量 V_1 的波形（测量频率，有效值），并和单相半整流电路实验中的步骤②的波形进行对比，分析原因。

② 断开电源，将电路 A 点连接后级电路，不接 R_{L1} ，打开电源，测量 V_1 和 V_0 的波形，并记录 V_1 、 V_0 和输出纹波电压 V_{ow} 的电压值。填入表 8-5 中。

③ 断开电源， R_{L1} 接入电路，打开电源，测量 V_1 和 V_0 的波形，以及 V_0 的纹波电压波形，并记录两个 V_1 和 V_0 电压平均值以及输出纹波电压 V_{ow} 的有效值。填入表 8-5 中。由前面的实验，根据 R_L 的不同，计算输出电阻系数。

$r_o=$

$$r_o = \frac{|\Delta U_o|}{|\Delta I_o|}$$

表 8-5 LM7812 构成的直流稳压电路的测试表

R_{L1} 不接入电路	R_{L1} 接入电路
V_1 、 V_0 的波形和平均值， V_{ow} 的有效值 $V_1=$ ___ V $V_0=$ ___ V $V_{ow}=$ ___ V	V_1 、 V_0 的波形和平均值， V_{ow} 的有效值 $V_1=$ ___ V $V_0=$ ___ V $V_{ow}=$ ___ V

8.6 实验注意事项

1. 所有标注了极性的电容都为电解电容，接入电路时其+极不能反接。
2. 每次更换电路时，必须断开电源，严禁带电操作。不能用手触碰裸露的导线，防止触电。
3. 电路工作一段时间后，芯片或者电阻会发热，不要触摸，防止烫伤。
4. 电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

8.7 故障分析与检查排除

参考实验一 1.7。

8.8 实验思考题

1. 在整流电路中，输出电容的作用是什么，请用实验数据进行分析。
2. 对于同样的输入电压，请分析单相半波整流电路和桥式整流电路输出电压有何不同，为什么？
3. 桥式整流电路中某二极管接反会出现什么现象？若某二极管开路又会怎样？
4. 绘制电容滤波电路的输出波形，并据此说明二极管的导通角以及流过二极管的电流与无滤波电容时有何变化？
5. 说明如何检测电容滤波电路中二极管的导通角？

实验九集成功率放大器电路

9.1 实验目的

1. 了解集成功率放大电路的使用方法；
2. 学习集成功率放大电路的静态测试和动态测试方法。

9.2 实验预习要求

1. 复习集成功率放大电路的相关知识。
2. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项，预习实验中使用到的集成功率放大器的工作原理和使用方法；

9.3 实验仪器与器件

表 9-1 实验仪器和器件表

	名称	数量	型号
1	三路线性稳压直流电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke 287C
3	示波器	1 台	Tek MSO2012B
4	信号发生器	1 台	Tek AFG1062
5	二极管	3 只	1N4007*2
6	集成功放芯片	1 只	LA4102*1
7	电容	若干	50pF×1, 1000pF×1, 0.15μF×1, 4.7μF/35V×1, 33μF/35V×1, 100μF/35V×2, 220μF/35V×1, 470μF/35V×1, 1000μF×1
8	电阻	若干	8.2Ω/2W×2, 100Ω/0.25W×1
9	扬声器	1 只	8Ω
10	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
11	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

9.4 实验原理

9.4.1 集成功率运放 LA4102 的基本原理

集成功率放大器电路由集成功放芯片和一些外部阻容元件构成。它具有线路简单、性能优越、工作可靠、调试方便等优点，已经在音频领域中应用广泛。

集成功率放大电路中最主要的组件为集成功放芯片，集成功放的种类很多，本实验采用的集成功放芯片型号为 LA4102，它的外部引脚如图 9-1 所示。LA4102 为 14 脚双列直插式，引脚含义如表 9-2 所示。



图 9-1 LA4102 的引脚图

图 9-2 LA4102 内部电路原理图

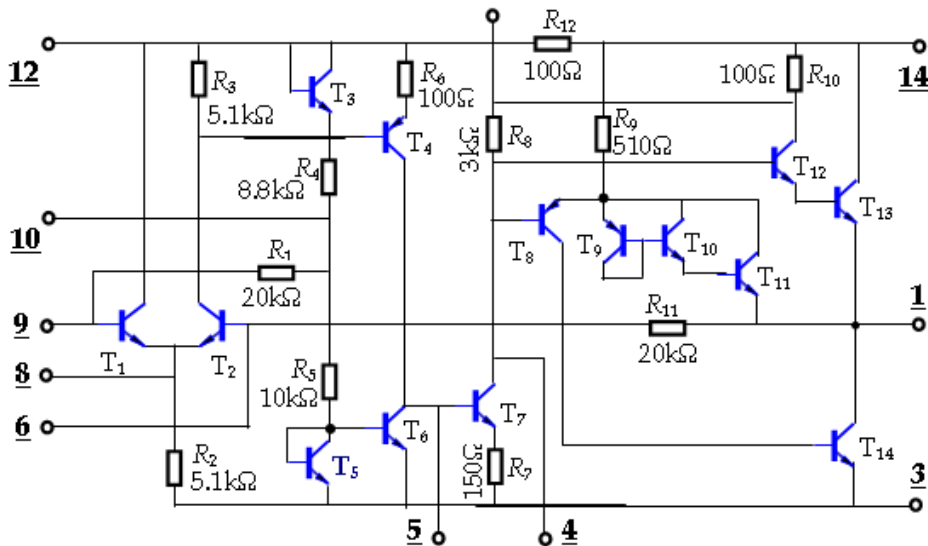


表 9-2 LA4102 各引脚含义

PIN1	PIN2	PIN3	PIN4	PIN5	PIN6	PIN7
输出	/	地	消振	消振	反馈	/
PIN8	PIN9	PIN10	PIN11	PIN12	PIN13	PIN14
/	输入	滤波	/	前级电源	自举	电源

表 9-3 和表 9-4 为它的极限参数和典型电参数。使用的时候要注意，不能超过极限参数，要设计在典型参数的范围内使用。

表 9-3 LA4102 的极限参数

参数	符号与单位	额定值
最大电源电压	U_{CCmax} (V)	14 (有信号时)
允许功耗	P_0 (W)	1.2
		2.25 (50mm×50mm 铜箔散热片)
工作温度	θ_{opr} (°C)	-20~+70

表 9-4 LA4102 的典型电参数

参数	符号与单位	测试条件	典型值
工作电压	U_{CC} (V)		9
静态电流	I_{CC0} (mA)	$U_{CC}=9V$	15
开环电压增益	A_{Vo} (dB)		70
输出功率	P_0 (W)	$R_L=4\Omega$ 或 8Ω $f=1kHz$	2.1 (1.4)
输入阻抗	R_i (k Ω)		20

9.4.2 集成功放 LA4102 的典型电路应用

集成功率放大器 LA4102 的应用电路如图 9-3 所示，该电路中各电容和电阻的作用简要说明如下：

C_1 、 C_9 ——输入输出耦合电容，隔直作用。

C_2 ——反馈元件，决定电路的闭环增益。

C_3 、 C_4 、 C_8 ——滤波、退耦电容

C_5 、 C_6 、 C_{10} ——消振电容、消除产生振荡。

C_7 ——自举电容。

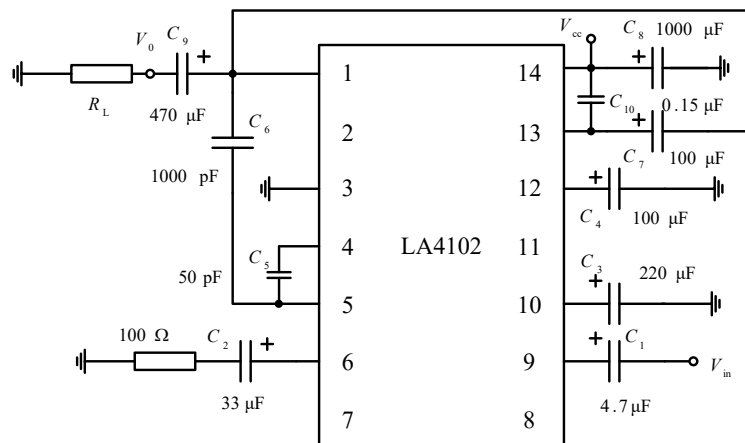


图 9-3 LA4102 典型应用电路图

9.5 实验步骤

注意事项：

- 1、所有标注了极性的电容都为电解电容，接入电路时其+极和正电压相连，不能反接。
- 2、电源电压不允许超过极限值，否则集成芯片会烧坏。
- 3、输入信号不能过大。
- 4、上电前要仔细检查电路，每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
- 5、不能用手触碰裸露的导线，防止触电。
- 6、在电路工作中，如果发现输出波形不对，或者异常声音或者异常发热，或者电源显示的电压比设置电压低很多，或者电源的输出电流异常增大，需要马上断电，检查电路。

1. 实验前检查

将芯片正确安装在芯片座上，脚位正确，散热片在上方。用万用表的电阻通断档位，测试芯片的每个引脚到芯片座上的接线口处通断，是否连通，如果不通，需要重新安装芯片或者更换芯片座。

2. 静态工作测试

选择元器件，按图 9-3 接线。将输入信号 V_{in} 接地，调节直流稳压电源 DP832A 输出+6V，接到 PIN14 的 V_{cc} 端， R_L 选择 8.2Ω 电阻，输出电压 V_o 为 R_L 上的电压。用万用表的直流电压档，测试 LA4102 工作时各引脚对地的电压，记入表格 9-5 中。

表 9-5 静态工作点电压测试

管脚	PIN1	PIN2	PIN3	PIN4	PIN5	PIN6	PIN7
电压 (V)							
管脚	PIN8	PIN9	PIN10	PIN11	PIN12	PIN13	PIN14
电压 (V)							

3. 动态工作测试

1) 最大输出功率

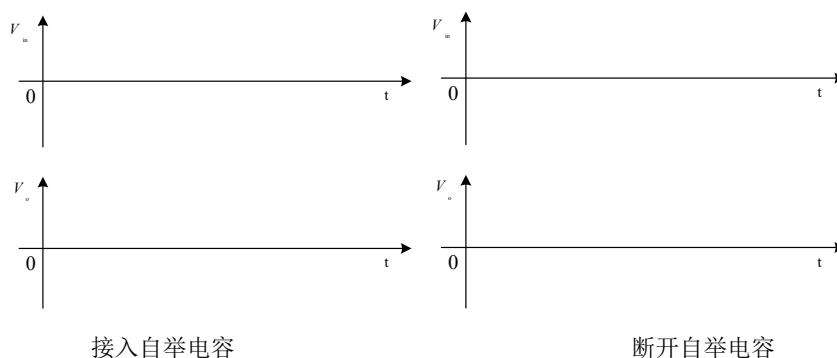
① 有自举电容 C_7

使用信号发生器，使得输入信号 V_{in} 为 1kHz 的正弦信号，示波器的两个通道，分别检测输入信号 V_{in} 和输出信号 V_o ，逐渐增大输入信号幅度，使得输出电压为方波，幅值最小不失真。此时，幅值为 V_{om} ，最大输出功率为： $P_{om}=V_{om}^2/R_L$ ， $P_{om}=\quad$

提示：输入信号可从 20mV 增加到 150mV 左右，不可过大否则烧坏芯片。

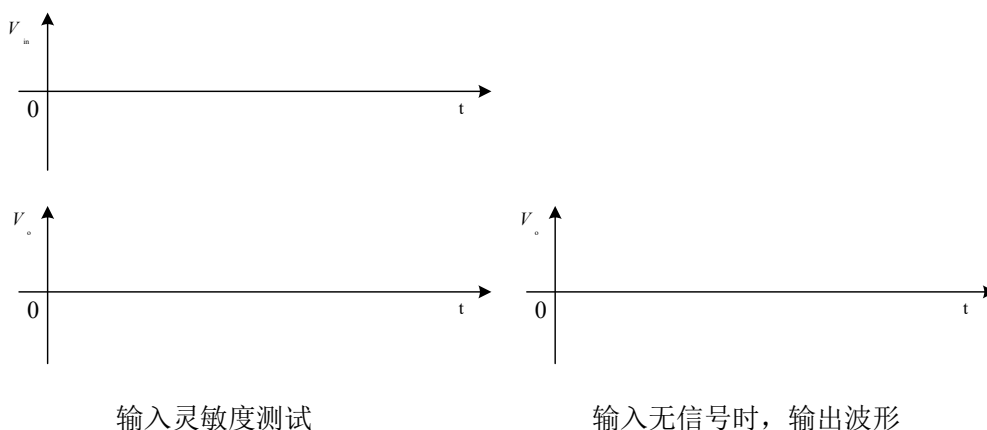
② 断开自举电容 C_7

在最小不失真的情况下，保持输入电压不变，断开自举电容 C_7 ，观察输出电压波形的变化情况，记录下波形的变化情况。



2) 输入灵敏度

接上自举电容 C_7 ，在小于 100mV 的范围内调节 V_{in} ，观察输出波形失真的波形，并记录。



3) 观察输入无信号时，输出电压波形变化。

在无输入信号时，观察输出电压 V_o 的变化，这个波形是否正常？并画出波形。

4) 带蜂鸣器测试

将负载 R_L 更换为蜂鸣器，输入信号为正弦，有效值为 150mV，频率从 50Hz 连续变化到 15kHz，以及观察输出电压的变化，并记录输出电压有效值随频率变化数据于表 9-6，聆听蜂鸣器的发声，观察并描述现

象。

注意：频率不可大于 15kHz，长时间工作，会烧坏蜂鸣器和芯片。

表 9-6 带蜂鸣器测试表格

f/Hz	50	100	150	200	500	1k	4k	8k	10k	12k	15k
U_o/V											

9.6 实验注意事项

1. 所有标注了极性的电容都为电解电容，接入电路时其+极和正电压相连，不能反接。
2. 电源电压不允许超过极限值，否则集成芯片会烧坏。
3. 输入信号不能过大。
4. 上电前要仔细检查电路，每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
5. 在电路工作中，如果发现输出波形不对，或者异常声音或者异常发热，或者电源显示的电压比设置电压低很多，或者电源的输出电流异常增大，需要马上断电，检查电路。

9.7 故障分析与检查排除

参考实验一 1.7。

9.8 实验思考题

1. 讨论实验中你遇到的问题及解决的方法。