

浙江大学



本科生课程专题研究

学年、学期： 2020 — 2021 学年 秋冬 学期

课程名称： 电子电路基础

任课教师： 金韬

题 目： 用运算放大器设计万用表

电子电路基础专题研究：用运算放大器设计万用表

信工 1903 班

黄嘉欣

3190102060

摘要：在进行电路测量时，万用表是我们时常需要用到的重要仪器。但以往的指针式万用表多采用分立元件构成分流分压电路，输入阻抗较小，刻度线性度也比较差，测量结果往往会有所偏差。为了获得更高的灵敏度，提高测量精度，我们可以将运放电路作为万用表的核心，在提高输入阻抗的同时，通过各种电路搭配，实现电量测量的功能。本专题研究以 LM358 双运算放大器和模拟表头为基础，设计了一个万用表电路，既能实现万用表的基本测量功能，又在此基础上添加了不同的量程，以满足更广泛的测量条件，具有很好的现实作用。

一、电路设计原理

由于数字式万用表与指针式万用表原理上的区别，数字式万用表的设计重点不在于传统的分压分流法测量，而是充分利用运算放大器的放大作用，在理想运放“虚短”、“虚断”的前提下，通过合理搭建模块电路，推导出流过表头的电流与被测电量之间的关系，并以此结合实际需求，选择合适的元件参数值，完成模块设计。通过合适的档位连接（即内部不同测量线路的开关组合），将各个功能模块集成为一个整体。

二、电路设计思路

2.1 直流电流测量

在实际电路测量过程当中，被测电流往往没有接地点，属于浮地电流。为了能够将数字万用表串联在任意电流通路中使用，我们需要将运放的输入（同相或反相端）直接接地，在确保电路回路正确的同时，避免引入多余电阻使得原电路的电流值改变。另一方面，由于运放的“虚断”特性，其同相端、反相端输入电流近乎为 0。如果将表头直接串联在同相、反相输入端，其将不会偏转。即使设计一并联电路接在表头靠近运放输入端，如图 2.1.1 所示，由于表头自身存在内阻，对测量结果的精度也会有所影响。

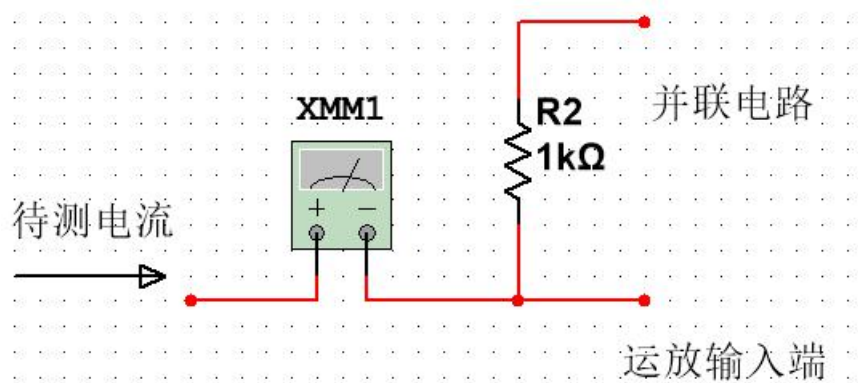


图 2.1.1 直流电流测量表头串联示意图（错误接法）

因此，为了确保测量结果尽可能准确，我们需要将表头接在运算放大器的反馈回路当中，并采用适当的并联电路，使电流不用从同相、反相端流入，为待测电流提供可行回路，以克服“虚断”的影响，如图：

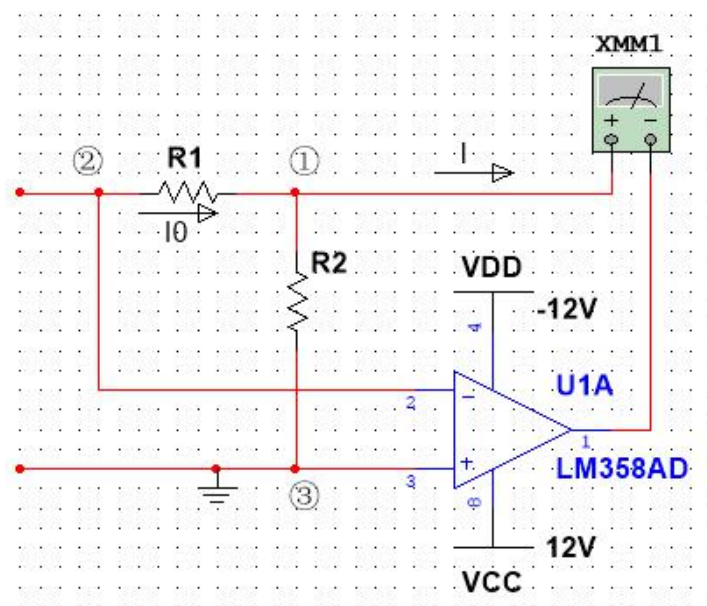


图 2.1.2 直流电流测量电路原理图

由于“虚短”特性，结点②和结点③的电压都为 0，则由欧姆定律，结点①的电势可分别表示为：

$$U = -I_0 R_1$$

$$U = (I_0 - I) R_2$$

可得：

$$I = \frac{R_1 + R_2}{R_2} I_0$$

可见，通过上述设计思路，流过表头的电流与表头无关，而只与并联回路中的 R_1 、 R_2 和待测电流 I_0 有关。通过调整 R_1 、 R_2 的取值，我们可以设计出不同的量程，以满足更多情况的使用。注意，由于表头额定电流的限制，我们需要给表头并联上一定阻值的分流电阻，以确保表头不被损坏。

2.2 直流电压测量

与测量直流电流时同理，为了提高结果精度，模拟表头需要接在运放的反馈回路之中。由于测量直流电压时，我们无法确定与万用表并联元件的阻值，所以不能使用间接法，即通过测量电流求出电压。因此，输入运放的信号不应为电流信号，也就是说，待测电压的元件两端不能直接接到运放同相端和反相端，如图 2.2.1 所示：

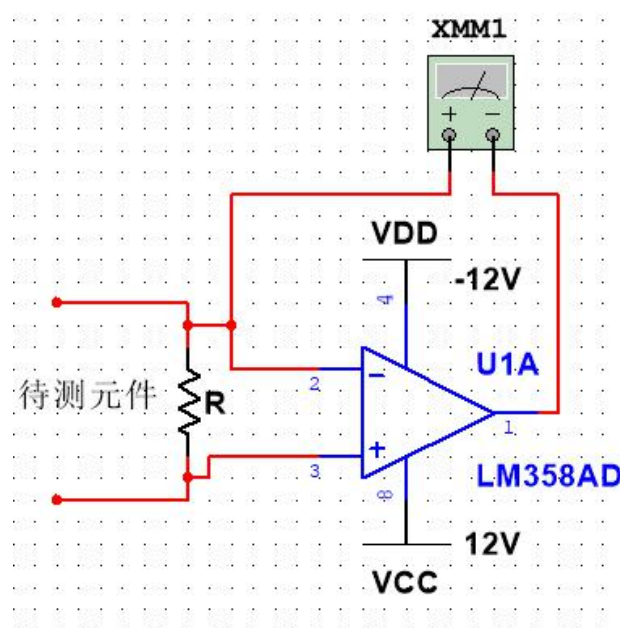


图 2.2.1 直流电压测量并联示意图（错误接法）

为了得到电压信号，我们可以考虑将待测电压元件并联在运放的同相端，得到较高的输入阻抗，并将同相端接地，则同相端的输入电压即为待测电压值。根据“虚短”特性，我们可以在反相端串入电阻后将其接地，此时流过电阻的电流只受同相端电压和电阻阻值影响，如图所示：

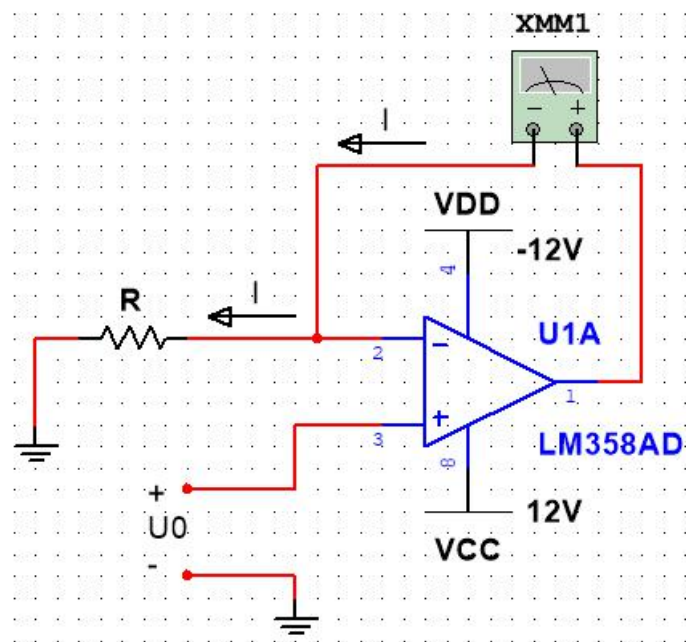


图 2.2.2 直流电压测量电路原理图

由欧姆定律可得：

$$I = \frac{U_0}{R}$$

可见，当我们将反相端电阻确定以后，流过表头的电流就只与待测电压线性相关，从而达到测量直流电压的目的。通过调整反相端电阻的阻值，我们可以设计不同的量程，在保证表头电流不超过额定值的前提下，满足更多情况的使用。

2.3 交流电流测量

根据 2.1 中的分析，交流电流的测量方法与直流电流大致相同，但由于模拟表头只能测量直流量，因此需要在电路中加入一整流电路，进而测出待测量的有效值。根据半波整流与全波整流的优缺点，可以选择桥式整流完成这一功能，如图：

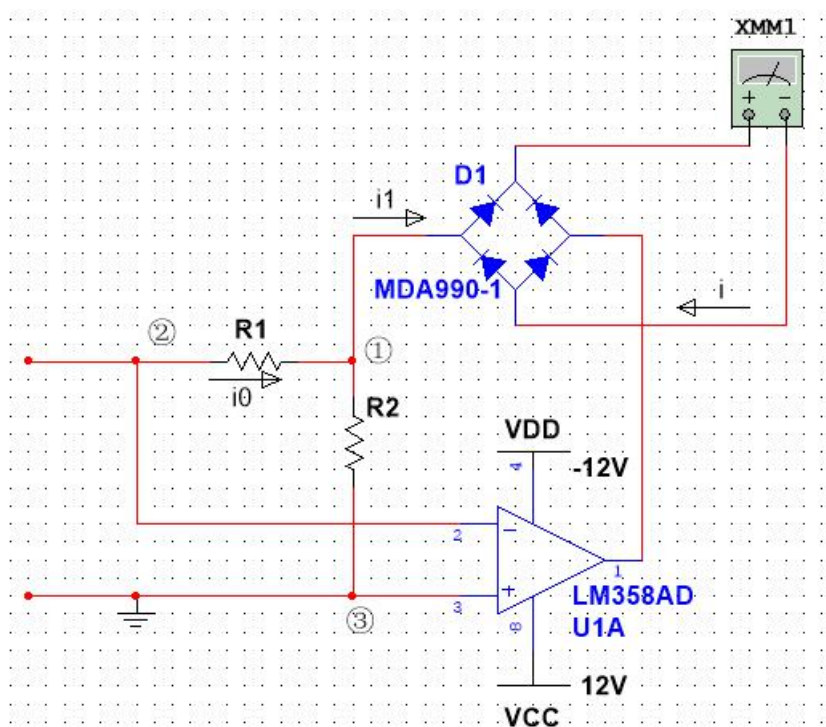


图 2.3 交流电流测量电路原理图

通过将整流电路串接在反馈回路当中，我们既可以在整合电路时使各个部分结构分明，降低电路的复杂度，又可以通过负反馈减小二极管的非线性影响，使结果更加精确。

当不考虑桥式整流时，由结点①处的电势：

$$U = -I_{0rms}R_1$$

$$U = (I_{0rms} - I_{1rms})R_2$$

可得：

$$I_{rms} = I_{1rms} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} I_{0rms}$$

又由桥式整流 0.9 倍特点，所以：

$$I_{rms} = 0.9 \frac{R_1 + R_2}{R_2} I_{0rms}$$

可见，此时表头测出的电流值与待测电流有效值线性相关，通过确定不同的 R_1 、 R_2 组合，我们可以设计出不同的量程，从而满足更多情况下的测量。需要注意的是，由于表头额定电流的限制，我们需要给表头并联一分流电阻，以确保表头电流不会过大，导致表头被损坏。

2.4 交流电压测量

同 2.3，为了测量交流电压，只需在测量直流电压电路的基础上添加一整流电路即可，如图：

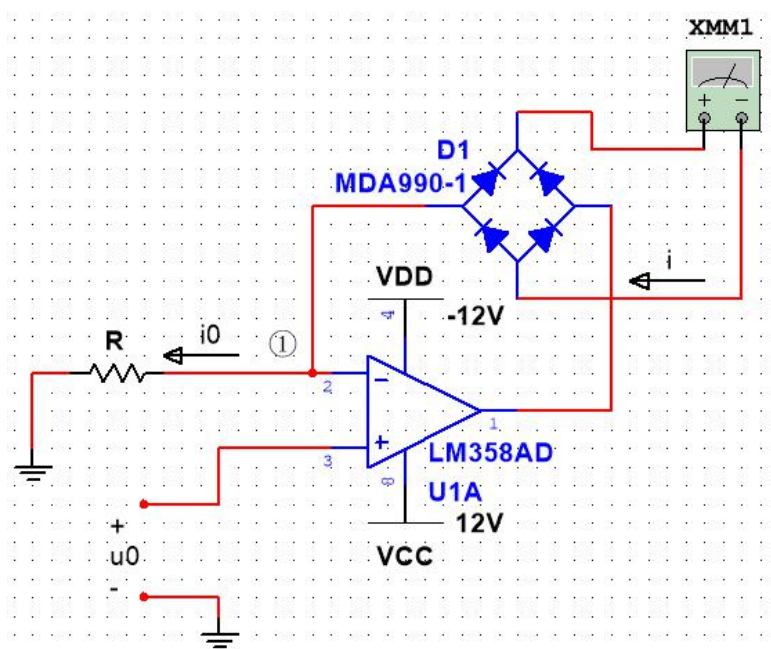


图 2.4 交流电压测量电路原理图

此时，由欧姆定律可得：

$$I_{rms} = I_{0rms} = \frac{U_{0rms}}{R}$$

又由桥式整流 0.9 倍特点，所以：

$$I_{rms} = 0.9 \frac{U_{0rms}}{R}$$

可见，流过表头的电流有效值与待测电压有效值线性相关，将 R 确定，便可以通过表头示数求得交流电压有效值。通过调整反相端电阻的阻值，我们可以设计不同的量程，在保证表头不被烧坏的前提下，满足更多情况的使用。

2.5 电阻测量

与前面几种电量测量方式不同，测量电阻时，由于外界没有直接输入，我们需要自行为运放提供差分信号。考虑到带反馈回路的运算放大器，其放大倍数与反馈电阻和反相端电阻相关，我们可以利用其这一特性，将表头接在运放的输出端，并以待测电阻作为反相端电阻，如图：

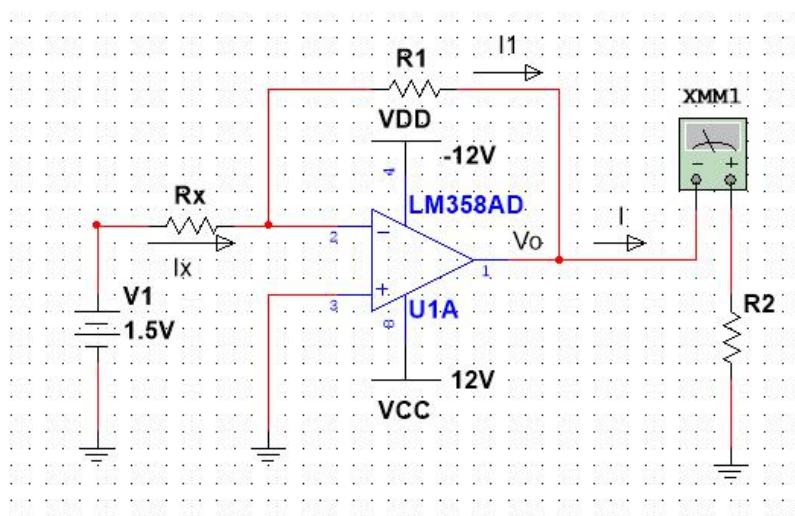


图 2.5.1 电阻测量电路原理图（1）

由于运放放大的信号为电压信号，我们可以先测出输出端电压，通过测量增益倍数，得到 R_x 与流过表头电流的关系：

$$V_o = I(r_g + R_2) \quad (1)$$

由运放增益倍数：

$$A = \frac{V_o}{V_1} = \frac{I(r_g + R_2)}{V_1} = -\frac{R_1}{R_x} \quad (2)$$

于是：

$$I = -\frac{V_1}{(r_g + R_2)} \frac{R_1}{R_x}$$

其中 r_g 为表头的内阻。

可见，经过这样设计电路，流过表头的电流与 R_x 呈反比关系，若进一步，将 R_1 与 R_x 交换位置，如图 2.5.2：

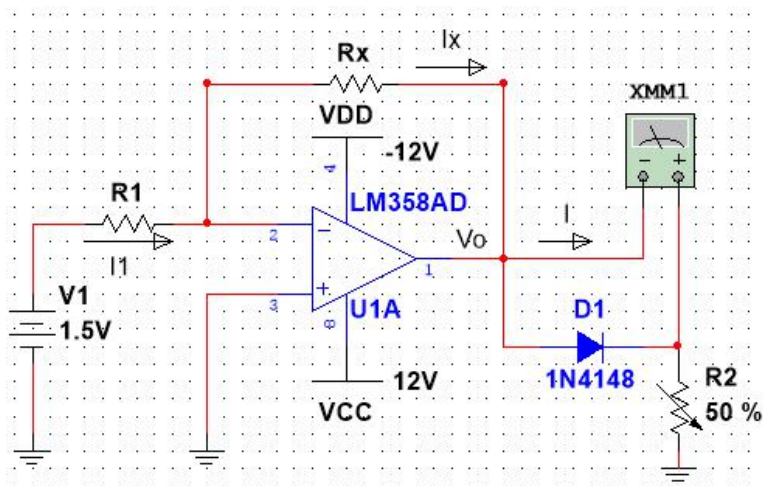


图 2.5.2 电阻测量电路原理图（2）

则得到 I 与 R_x 的关系为：

$$I = -\frac{V_1}{(r_g + R_2) R_1} R_x$$

此时流过表头的电流与 R_x 呈线性关系，比第一种接法得到的结果更加直观。当 $R_x = 0$ 时， $I = 0$ ，表头不偏转，可实现欧姆表的自动调零，这是指针式万用表所无法达到的效果。通过选用不同的 R_1 值，我们可以获得不同的测量量程，从而满足多种情况下的使用。

另外，考虑到 R_x 过大的情况，此时的输出电压 V_o 很大，流过表头的电流可能会超过额定值。为了保护表头不被损坏，需要与其并联一开关二极管（如图 2.5.2），使输出钳位，并通过调节 R_2 值，令电流表回到满偏状态。

三、完整电路说明

3.1 完整电路图

将（二）中各模块电路整合，可得万用表总体电路图，如图 3.1 所示：

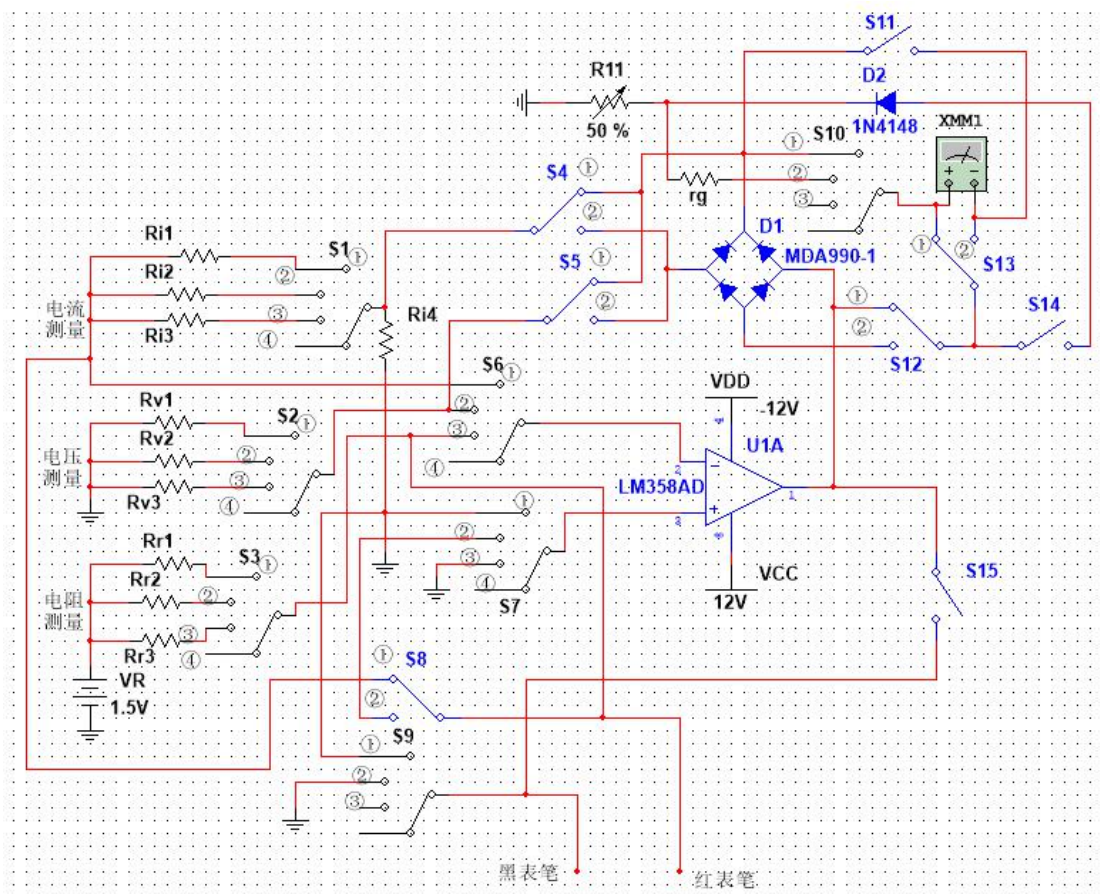


图 3.1 完整电路图

3.2 电路结构说明

如图，此万用表电路以运算放大器作为核心元件，左侧主要为各测量电路所选用的电阻，右上侧为桥式整流电路和模拟表头，下方为万用表的红、黑表笔接口。通过不同的开关组合，可以实现不同电量的测量功能。

其中，开关 S_6 、 S_7 为核心开关，其设在运放输入端干路之上，用来控制后续电路的接入，从而选择测量电量的类型：①对应电流，②对应电压，③对应电阻，④电路断开，此时万用表不工作；

开关 S_1 、 S_2 、 S_3 为量程控制开关，①、②、③对应不同阻值的电阻，通过接入到不同的电阻通路中，可以将万用表调到不同的量程状态，开关接到④时，万用表不工作；

开关 S_4 、 S_5 、 S_{12} 为交、直流切换开关，其决定着桥式整流电路是否会接入到电路当中，①对应直流测量，②对应交流测量。

开关 S_8 、 S_9 与 S_6 、 S_7 配套使用，控制万用表表笔的接法，当开关接到①时，

测量电流，当开关接到②时，测量电压；

开关 S_9 、 S_{10} 、 S_{12} 、 S_{14} 、 S_{15} 为电阻档的辅助开关，接到电阻档后， S_9 会跟随接到③、 S_{10} 接到②、 S_{12} 接到①， S_{14} 、 S_{15} 导通，完成表头接入电路的转换（从反馈回路到输出端），并接入待测电阻。此时表头的输入、输出对换（因为运放此时反相放大），开关二极管并入电路，从而保证测量电阻功能的正常实现。在其余情况下， S_{14} 、 S_{15} 都会断开；

开关 S_{10} 、 S_{11} 、 S_{13} 为直流电压档的辅助开关，接到电压档后， S_{10} 会跟随接到③， S_{13} 跟随接到①， S_{11} 导通，实现表头正负输入的对换（防止出现负值情况）。在其余情况下， S_{13} 都保持在②处， S_{11} 都会断开；

当 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_6 、 S_7 都接到④处时，万用表不工作。

3.3 各部分功能阐述

3.3.1 直流电流测量

将开关 S_4 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 S_9 、 S_{10} 、 S_{12} 接到①， S_5 、 S_{13} 接到②， S_3 接到④， S_{11} 、 S_{14} 、 S_{15} 断开，电路将接入直流电流测量档，其电路如图 3.3.1：

在电路中，红表笔接同相端、黑表笔接反相端，待测电流通过红、黑表笔构成完整回路； R_i 控制电流表的量程，其中， R_{i4} 阻值固定。根据开关 S_1 接入的不同，干路电阻会相应改变。由 2.1 分析可知，当待测电流增大时，通过减小干路电阻与 R_{i4} 的比值，可以减小流过表头的电流，从而实现更大范围电流的测量。

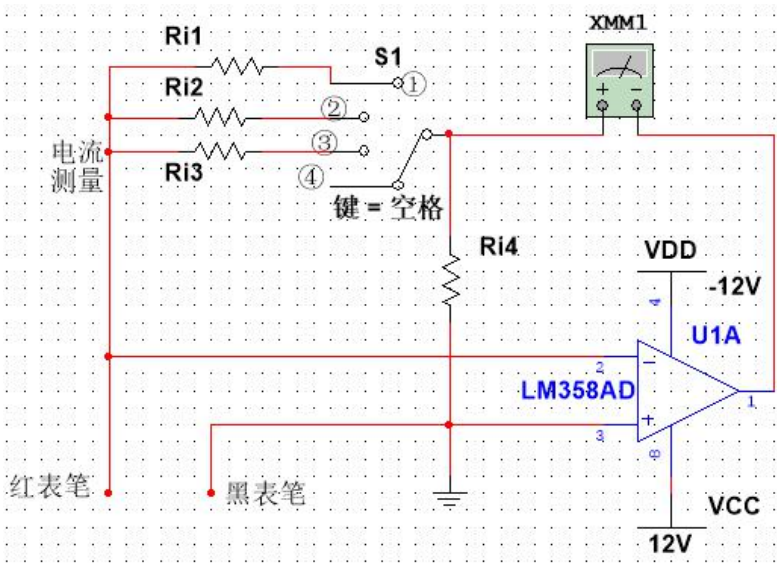


图 3.3.1 直流电流测量电路图

3.3.2 直流电压测量

将开关 S_5 、 S_{12} 、 S_{13} 接到①， S_4 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 S_9 接到②， S_{10} 接到③， S_{11} 导通， S_{14} 、 S_{15} 断开，电路将接入直流电压测量档，其电路如图 3.3.2 所示：

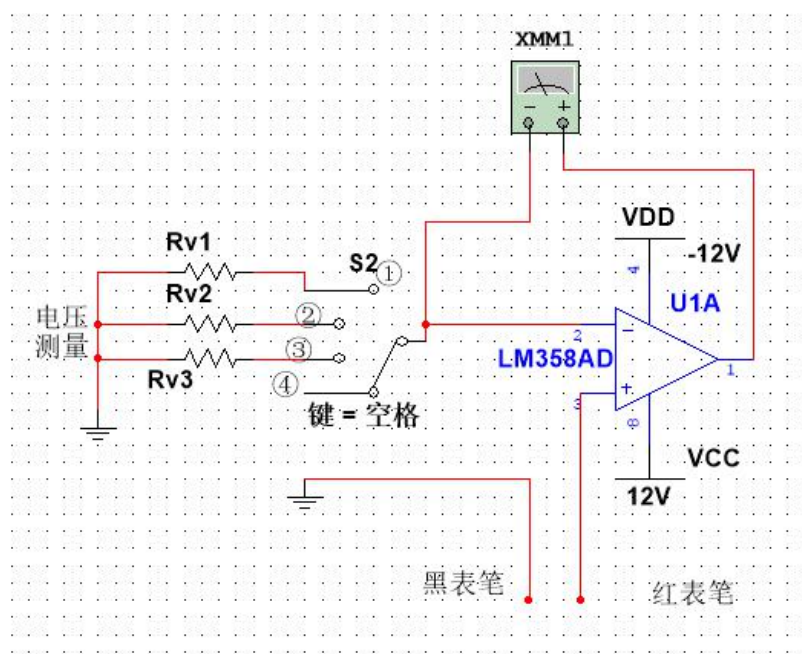


图 3.3.2 直流电压测量电路图

在电路中，红表笔接同相端，黑表笔接地，待测电压加在运放同相端。 R_v 控制着电流表的不同量程。由 2.2 分析可知，当待测电压增大时，只需要控制开关 S_2 接入更大的电阻，便可以减小流过表头的电阻，获得更大范围的电压测量效果。

3.3.3 交流电流测量

将开关 S_5 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 S_9 、 S_{10} 接到①， S_4 、 S_{12} 、 S_{13} 接到②， S_3 接到④， S_{11} 、 S_{14} 、 S_{15} 断开，电路将接入交流电流测量档，其电路如图 3.3.3 所示：

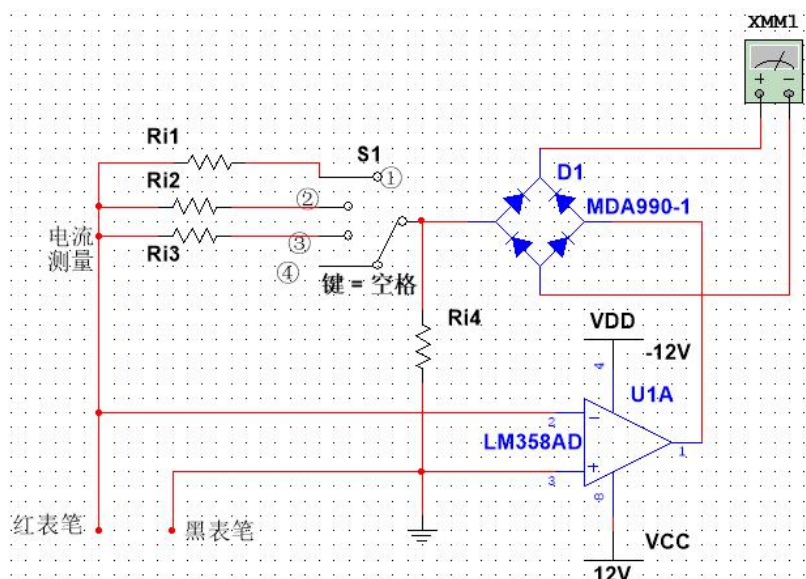


图 3.3.3 交流电流测量电路图

与直流电流测量原理类似，只需要在反馈回路中串入一桥式整流电路，便可使表头正常工作，进而测量出待测交流电流。

3.3.4 交流电压测量

将开关 S_4 、 S_{13} 接到①， S_5 、 S_6 、 S_7 、 S_8 、 S_9 、 S_{12} 、 S_{13} 接到②， S_{10} 接到③， S_{11} 、 S_{14} 、 S_{15} 断开，电路将接入交流电压测量档，其电路如图 3.3.4 所示：

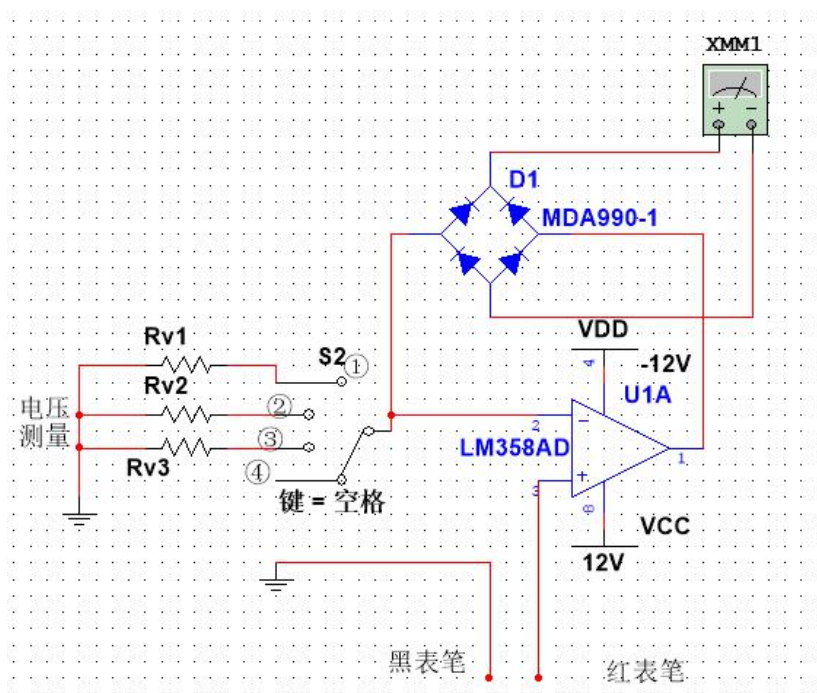
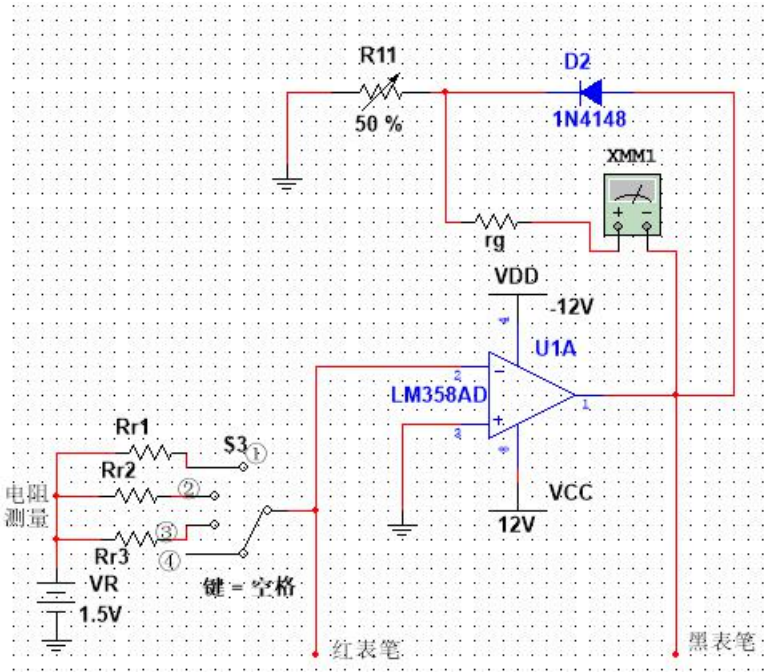


图 3.3.4 交流电压测量电路图

与直流电压测量原理类似，只需要在反馈回路中串入一桥式整流电路，便可以使表头正常工作，从而测量出待测交流电压。

3.3.5 电阻测量

将开关 S_{12} 接到①， S_{10} 、 S_{13} 接到②， S_6 、 S_7 、 S_9 接到③， S_{14} 、 S_{15} 导通， S_{11} 断开，电路将接入电阻测量档，其电路如图 3.3.5 所示：



Ps: r_g 为表头内阻，在其他功能模块中，因 r_g 与测量结果无关，故未画出。

图 3.3.5 电阻测量电路图

在电路中，有一直流电源为运放提供输入，待测电阻通过红、黑表笔接入反馈回路，通过切换 R_r 取值可以得到不同的量程。由 2.5 中分析可知，当待测电阻较大时，只需要控制 S_3 ，选取更大的 R_r ，便可以降低流过表头电流，从而增大可测量电阻阻值的范围。

四、元件参数选择

已知参数：表头与分流电阻的等效内阻 $r_g=10\Omega$ ，额定电流 $I_g=0.02A$ （分流电阻与表头并联，电路图中未画出），将分流电阻从电路中断开时，表头

的内阻为 $r_{g0}=1\text{ k}\Omega$ ，额定电流 $I_{g0}=100\mu\text{A}$ ，电阻档内部输入直流电压为 $V_1=1.5\text{V}$ ，调整电阻 $R_{i1}=4.9\text{ k}\Omega$ ；

设计要求：实现电流测量档三个量程： 1 mA 、 5 mA 、 10 mA ；

电压测量档三个量程： 0.5V 、 5V 、 50V ；

电阻测量档三个量程： $1\text{ k}\Omega$ 、 $10\text{ k}\Omega$ 、 $100\text{ k}\Omega$ ；

参数计算：

① 直流电流：由 2.1 可知：

$$\text{当量程为 } 1\text{ mA} \text{ 时, 有 } 1 + \frac{R_{i1}}{R_{i4}} = \frac{I_g}{I} = 20$$

$$\text{当量程为 } 5\text{ mA} \text{ 时, 有 } 1 + \frac{R_{i1}}{R_{i4}} = \frac{I_g}{I} = 4$$

$$\text{当量程为 } 10\text{ mA} \text{ 时, 有 } 1 + \frac{R_{i1}}{R_{i4}} = \frac{I_g}{I} = 2$$

$$\text{取 } R_{i4}=100\Omega, \text{ 则 } R_{i1}=1.9\text{ k}\Omega, R_{i2}=300\Omega, R_{i3}=100\Omega$$

对交流电流，有：

$$\text{当量程为 } 1\text{ mA} \text{ 时, 有 } 1 + \frac{R_{i1}}{R_{i4}} = \frac{20}{0.9} = 22.22$$

$$\text{当量程为 } 5\text{ mA} \text{ 时, 有 } 1 + \frac{R_{i1}}{R_{i4}} = 4.44$$

$$\text{当量程为 } 10\text{ mA} \text{ 时, 有 } 1 + \frac{R_{i1}}{R_{i4}} = 2.22$$

$$\text{取 } R_{i4}=100\Omega, \text{ 则 } R_{i1}=2.12\text{ k}\Omega, R_{i2}=344\Omega, R_{i3}=122\Omega$$

ps：实际电路中交、直流电阻可以使用同一组，只是量程会稍有差异，最后对测得数据的处理方式稍有区别（交流需多除以 0.9）。

② 电压：根据所给参数，直接只改变电阻 R_v 可能会导致运放不能工作在理想放大状态，需要对表头进行限流，将分流电阻从电路中断开，此时 $I_{g0}=100\mu\text{A}$ 。

由 2.2 可知：

$$\text{当量程为 } 0.5\text{V} \text{ 时, 有 } R_{v1} = \frac{U}{I_{g0}} = 5\text{ k}\Omega$$

$$\text{当量程为 } 5\text{V} \text{ 时, 有 } R_{v2} = \frac{U}{I_{g0}} = 50\text{ k}\Omega$$

当量程为 $50V$ 时，有 $R_{v3} = \frac{U}{I_{g0}} = 500k\Omega$

对交流电压，则：

当量程为 $0.5V$ 时，有 $R_{v1} = 0.9 \frac{U}{I_{g0}} = 4.5k\Omega$

当量程为 $5V$ 时，有 $R_{v2} = 0.9 \frac{U}{I_{g0}} = 45k\Omega$

当量程为 $50V$ 时，有 $R_{v3} = 0.9 \frac{U}{I_{g0}} = 450k\Omega$

ps：实际电路中交、直流电阻可以使用同一组，只是量程会稍有差异，最后对测得数据的处理方式稍有区别（交流需多除以 0.9）。

③ 电阻：根据所给参数，直接只改变电阻 R_r 可能会导致运放不能工作在理想放大状态，故需要进行限流，将分流电阻从电路中断开，此时 $r_{g0} = 1k\Omega$ ，
 $I_{g0} = 100\mu A$ 。由 2.5 可知：

当量程为 $1k\Omega$ 时，有 $R_{r1} = \frac{R_x V_1}{I_{g0}(r_{g0} + R_{11})} = 2.54k\Omega$

当量程为 $10k\Omega$ 时，有 $R_{r2} = \frac{R_x V_1}{I_g(r_g + R_{11})} = 25.4k\Omega$

当量程为 $100k\Omega$ 时，有 $R_{r3} = \frac{R_x V_1}{I_g(r_g + R_{11})} = 254k\Omega$

五、仿真结果及分析

5.1 直流电流测量

表 5.1 直流电流测量仿真数据

量程/ mA	待测电流值/ mA	测量电流值/ mA	相对误差
1	0.2	0.200	0
	0.6	0.600	0

	1	1.000	0
5	1.5	1.500	0
	3.5	3.500	0
	5	5.000	0
10	7	7.000	0
	8.5	8.500	0
	10	10.000	0

分析：由仿真结果可知，在测量直流电流时，设计电路所得到的测量结果与实际输入值吻合得非常好。这表明所设计的万用表直流电流档三个量程都能够比较准确地完成测量任务，设计结果达到了预期的要求。

5.2 直流电压测量

表 5.2 直流电压测量仿真数据

量程/ V	待测电压值/ V	测量电压值/ V	相对误差
0.5	0.1	0.09986	0.14%
	0.35	0.3498	0.057%
	0.5	0.4998	0.04%
5	1	0.9989	0.11%
	3	2.9988	0.04%
	5	4.9987	0.026%
50	10	9.9895	0.105%
	25	24.9745	0.102%
	50	49.9880	0.024%

Ps: 当电压档量程增大时，需相应提高运放的直流偏置电压，使运放能够正常工作。

分析：由仿真结果可知，在测量直流电压时，设计电路仿真得到的测量结果与实

际输入值的最大相对误差为 0.14%，两者吻合很好。因此，根据设计思路得到的万用表直流电压档三个量程都能够比较准确地完成测量任务，设计结果达到了预期的要求。

5.3 交流电流测量

表 5.3 交流电流测量仿真数据

量程/ mA	待测电流有效值/ mA	测量电流有效值/ mA	相对误差
1	0.141	0.1412	0.14%
	0.424	0.4237	0.007%
	0.777	0.7761	0.12%
5	1.06	1.059	0.09%
	2.47	2.472	0.07%
	4.24	4.238	0.04%
10	5.64	5.651	0.20%
	7.06	7.064	0.06%
	9.18	9.184	0.04%

分析：由仿真结果可知，在测量交流电流时，设计电路所得到的测量结果与实际输入值的最大相对误差为 0.20%，两者吻合很好。仿真数据表明设计的万用表交流电流档三个量程都能够比较准确地完成测量任务，设计结果达到了预期的要求。

5.4 交流电压测量

表 5.4 交流电压测量仿真数据

量程/ V	待测电压有效值/ V	测量电压有效值/ V	相对误差
---------	--------------	--------------	------

0.5	0.177	0.1759	0.62%
	0.353	0.3497	0.93%
	0.494	0.4932	0.16%
5	1.13	1.1264	0.32%
	2.40	2.3802	0.83%
	4.37	4.346	0.56%
50	10.6	10.579	0.20%
	24.7	24.640	0.24%
	45.9	45.570	0.72%

Ps: 当电压档量程增大时，需相应提高运放的直流偏置电压，使运放能够正常工作。

分析：由仿真结果可知，在测量交流电压时，设计电路所得到的测量结果与实际输入值的最大相对误差为 0.93%，出现较大偏差的原因可能是因为在理论计算过程中，我们并没有考虑到二极管的导通压降和电容效应，推导出的公式含有些许误差。但总的来说，测量值与输入值在误差允许范围内吻合较好。这表明根据思路所设计的万用表交流电压档三个量程都能够比较准确地完成测量任务，设计结果达到了预期的要求。

5.5 电阻测量

表 5.5 电阻测量仿真数据

量程/ $k\Omega$	待测电阻值/ $k\Omega$	测量电阻值/ $k\Omega$	相对误差
1	0.1	0.09997	0.03%
	0.5	0.4996	0.08%
	1	0.9992	0.08%
10	3	2.9988	0.04%
	6.5	6.4967	0.051%

	10	9.9947	0.053%
100	25	25.0880	0.35%
	58	58.1969	0.34%
	95	95.2310	0.24%

分析：由仿真结果可知，在测量电阻时，设计电路所得到的测量结果与实际输入值的最大相对误差为 0.35%，两者在误差范围内吻合很好。这表明我们根据思路设计的万用表电阻档三个量程都能够比较准确地完成测量任务，设计结果达到了预期要求。

六、附加简要设计思路

6.1 电容测量：

根据所学知识，在交流通路当中，电容、电感具有阻抗，其表现出来的电路性质与电阻相似（不考虑相位变化）。因此，我们可以采用类似于电阻测量的方法，使用交流输入，对电容值进行测量，如图：

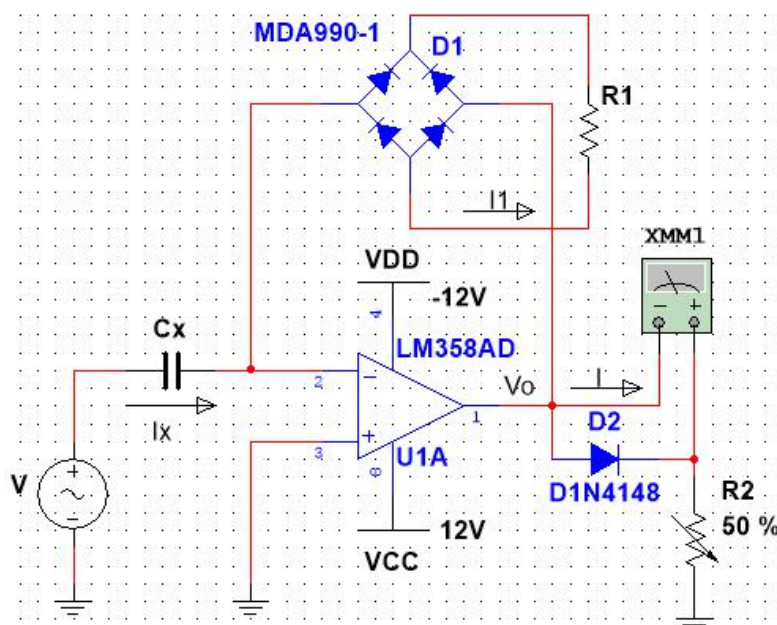


图 6.1 电容测量电路图

在反馈回路中，我们加入了桥式整流电路，以使表头能够正常测量出流过它

的电流值。由于电容阻抗与电容值成反比，故由 2.5 可知，需将电容串联在反相端，以得到最终的线性关系。通过使用相量法求出 \dot{V}_o （与 \dot{I} 有关），我们可以算得运放的增益倍数 $A = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}}$ ，而其又等于 $\frac{R_1}{Z_x}$ ，联立三个方程，便可以得到 \dot{I} 与 Z_x 的关系（ Z_x 为电容的阻抗）。

除此之外，考虑到当 C_x 太大时，运放增益较高，可能会导致流过表头电流超过额定值。为了避免表头损坏，我们可以在表头两端并联一开关二极管进行保护，并可调节 R_2 阻值，使表头回到满偏。

6.2 电感测量

与电容测量同理，由于电感的阻抗 $Z_x = j\omega L$ ，与电感值成正比，故将电感接在反馈回路当中，以得到 \dot{I} 与 Z_x 的线性关系。电路图如图：

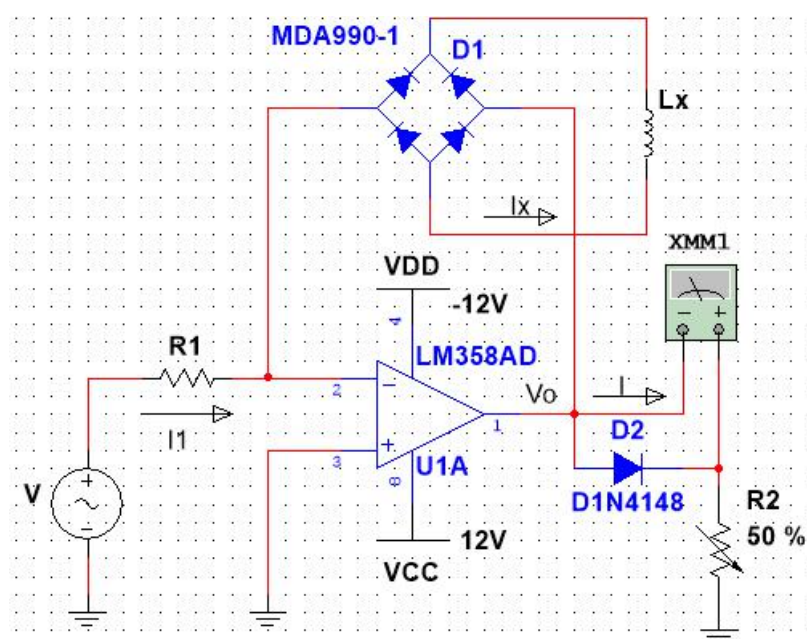


图 6.2 电感测量电路图

流过表头的电流 \dot{I} 与电感阻抗 Z_x 之间关系的推导同 6.1 类似，故不再赘述。

当电感值较大时，运放的输出电压可能会很高，引起表头载流过度。因此需要与其并联一开关二极管，实现钳位，并通过调节 R_2 ，使表头回到满偏状态。

七、总结与体会

此次专题研究，我们利用运算放大器和模拟表头设计了一个功能比较完备、测量比较准确的万用表，圆满达到了所给出的技术指标要求。在专题研究的过程当中，我们需要发动“头脑风暴”，充分利用运放的性质对电路进行设计：既考察了我们对已有知识，包括运算放大器、整流电路、开关二极管等的掌握程度，也锻炼了我们的创造能力。通过后期仿真，我们熟悉了 EDA 软件的使用，也学会了利用仿真软件对设计的电路进行调试、分析，受益匪浅。在后期整合模块时，我们需要做到电路的简单化、综合化，在尽量减少布线的基础上保证每个模块的独立性，不会因为模块之间的相互连接和其他细节（如接地等），而影响了自己功能的正常实现。当然，除了分析功能之外，我们也需要考虑到电路的美观程度。如何设置布局，使得电路既简洁、又直观，也是不容我们忽视的一个重点。

现如今，电路设计正越来越受到国家的重视，电路产业的发达与否，决定了我们科技发展的质量与前景。作为信电专业的学生，培养好这方面的专业知识，打好专业基础，也变得越来越重要。未来已来，韶华可期，相信，经过今日的不懈努力，在未来的某一天，我们也能够成为电子产业的生力军，为行业发展，做出属于自己的贡献。