

# 实验四 数字交流电压表 实验报告

姓名：屈晨迪

班级：自 71

学号：2017010928

桌号：10

日期：2019.6.3

# 1 实验目的

- (1) 熟悉小型电子系统的设计和实现;
- (2) 初步掌握小型电子系统的安装和调试方法;
- (3) 了解电压表性能指标意义, 并尝试改进电路性能;
- (4) 熟练掌握基于 Multisim 的电路设计和仿真

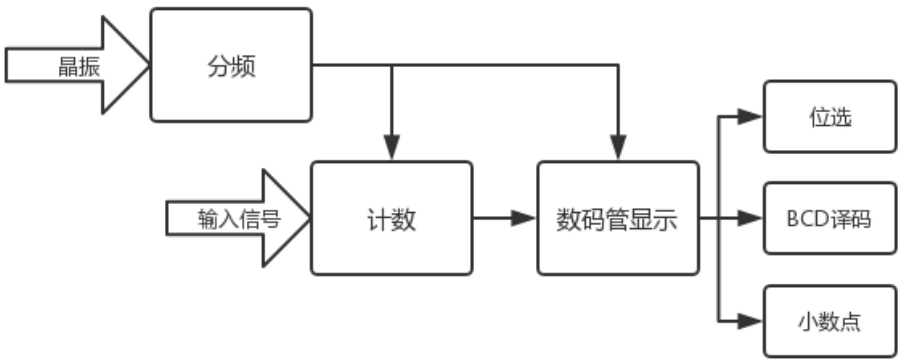
# 2 预习报告

## 2.1 电路框图设计

根据实验内容要求, 结合给出的实验电路参考设计框图, 画出数字化交流电压表的电路框图如下所示, 其中灰色是模拟部分, 黄色是数字部分, 红色为输入输出。



数字电路部分的详细框图如下, 其中最主要的计数模块, 这里放出代码和注释。



```
1 //计数单元
2
3 module counter
4
5 begin
6     input clk, //晶振时钟
7     input sig, //输入信号
8     output reg [9:0] freq //输出频率
9 end
10
11 reg [19:0] count; //计数
12 reg last_sig; //上一周期信号取值
13 reg [25:0] update; //用于更新计数的中间变量
14
15 always@(posedge clk)
16 begin
17     update<=update+1;
18     if(sig==1 && last_sig==0) //信号上升沿到达
19     begin
20         if(update>50000000) //间隔1s, 更新频率值
21         begin
22             freq<=50000000/(count+1); //计算输入信号频率
23             update<=0; //中间变量清零, 重新计数
24         end
25         count<=0;
26     end
27     else //一个周期内信号上升沿未到达以前
28     begin
29         count<=count+1; //计数
30     end
31     last_sig<=sig; //将输入信号当前状态赋给last_sig, 进入下一个CLK
32 end
33 endmodule
```

## 2.2 实验仿真

仿真电路如图 1 所示，电路主要由四个部分构成。

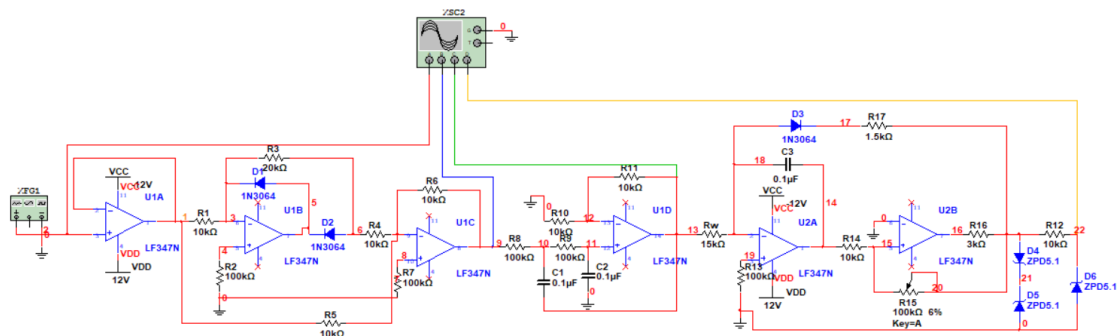


图 1 模拟部分仿真电路

### • 电压跟随器

电压跟随器的主要作用是实现输入阻抗变换，大幅度地提高了输入电阻值，能有效获取输入电压。仿真输入输出波形如图 2，可以看到输入输出完全相同。

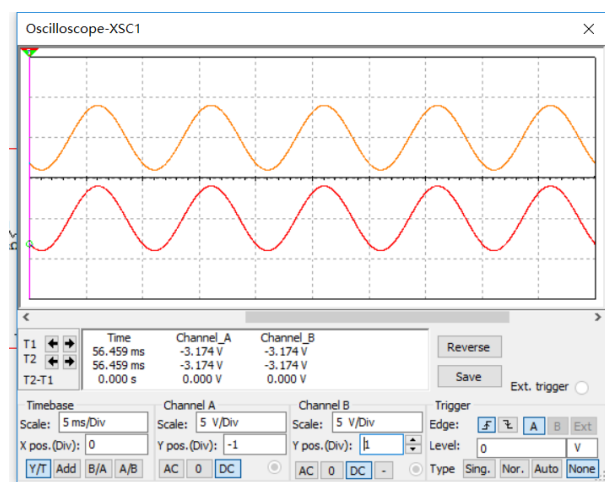


图 2 电压跟随器输入输出

### • 全波精密整流电路

精密整流电路如图 3 所示，该电路利用反向求和电路将  $-2u_I$  与  $u_I$  负半周波形相加，从而实现全波整流，电路输出电压

$$u_o = -u_6 - u_I$$

当  $u_I > 0$  时， $u_6 = -2u_I$ ， $u_o = 2u_I - u_I = u_I$ ；当  $u_I < 0$  时， $u_6 = 0$ ， $u_o = 0 - u_I = -u_I$ ；所以

$$u_o = |u_I|$$

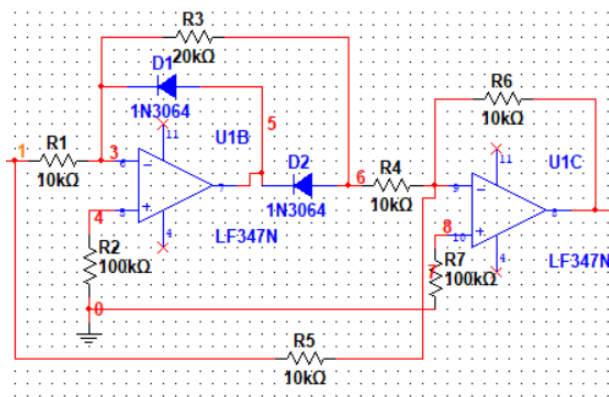


图 3 全波精密整流电路

电路仿真测试如图 4 所示，可以看到蓝色输出波形幅值是红色输入正弦波的绝对值。

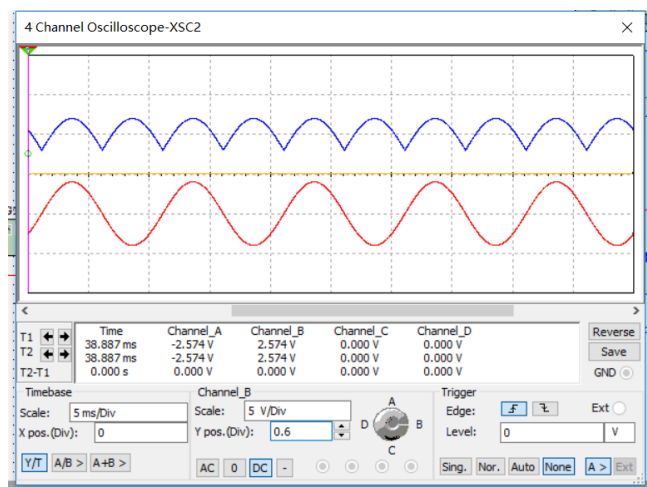


图 4 全波整流输入输出波形

### • VCVS 二阶低通滤波电路

低通滤波电路连接如图 5，主要作用是从全波整流后的正弦波中提取出直流分量。

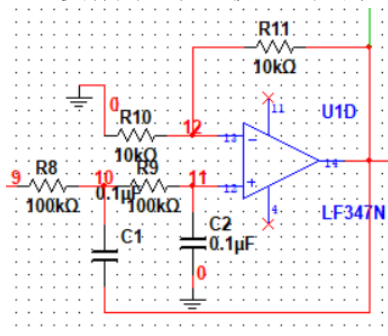


图 5 VCVS 二阶低通滤波器

可以求得电路特征频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \approx 16\text{Hz}$ ，最大电压放大倍数为 2，电路测试仿真波形如图 6，可以看到输出为稳定的直流电压。

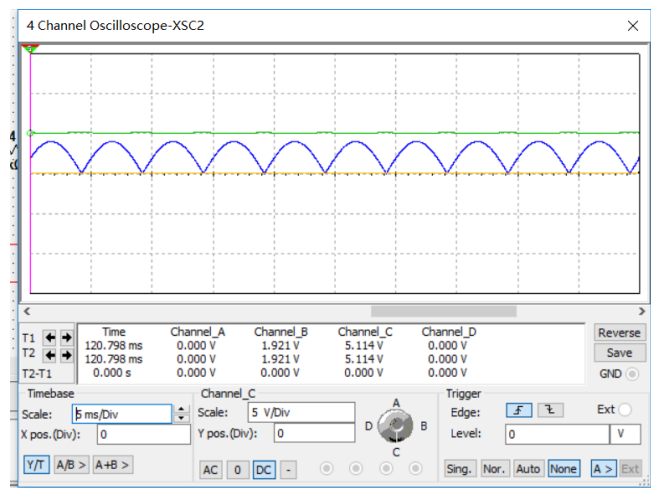


图 6 低通滤波器输入输出波形

### • 电荷平衡式电压-频率转换电路

电压-频率转换电路如图 7 所示，用于将输入的直流电压转换成频率与其数值成正比的输出电压，由于  $R_w \gg R_{17}$ ，振荡周期可以近似为

$$T = \frac{2R_{14}R_wCU_Z}{R_{15}} \cdot \frac{1}{|u_I|}$$

为了输出电压后续能接到 FPGA 板中，在输出端又接了一个稳压管，得到的矩形波电压约从-0.7 到+5V。

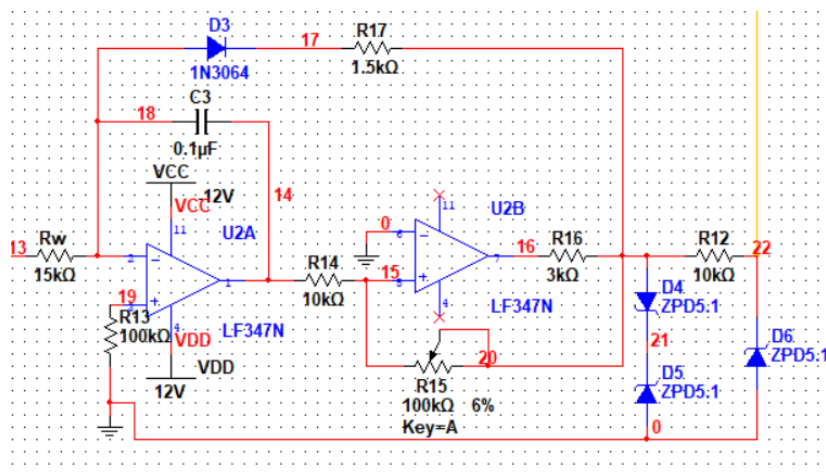


图 7 V-F 转换电路

本电路中已将元件值调整完成，使输入 1V 正弦波时，矩形波频率约为 100Hz，仿真测试波形如图 8 所示，可以看到此时周期为 9.588ms。

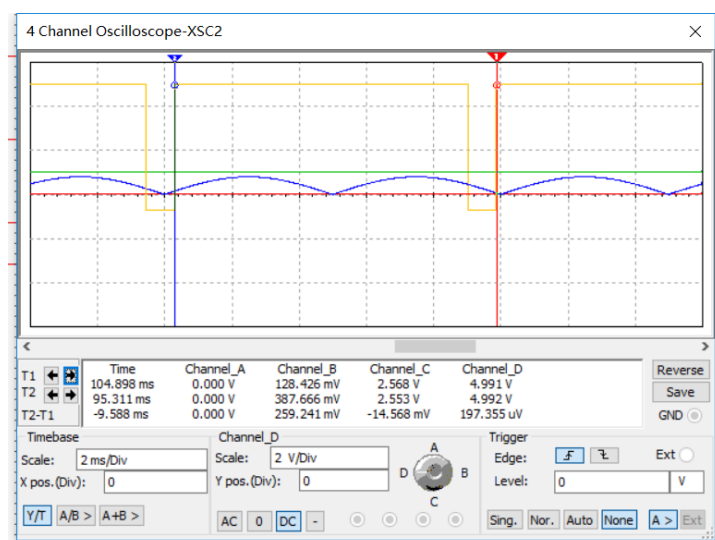


图 8 测量 1V 正弦输入的波形

## 2.3 电路设计

本次实验需要用到 6 个运算放大器，为了便于接线，共使用 3 个芯片，电路在面包板上的布局如图 9。

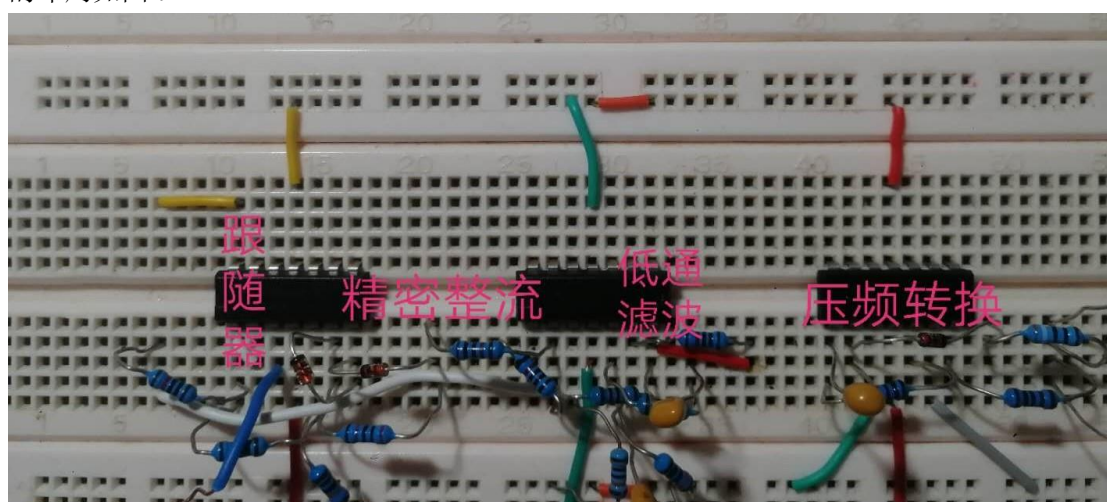


图 9 电路布局

## 2.4 调试方案

完成接线并上电之后，用示波器逐级检查输出是否符合要求，跟随器的输出应与输入正弦波完全相同，精密整流部分的输出应为输入正弦波的绝对值，频率变为原来的两倍，滤波一级的输出应是某一先前设定的幅值的直流信号，最后压频转换的输出是方波，电压值大约在 -0.1V 到 5V 之间，且频率应与输入信号的幅值成倍数关系。

检查各级输出波形正常后，可将输入置为 1V、100Hz 的正弦波，调节 V-F 部分的电路参数，使输出方波的频率约为 100Hz，再加大输入信号幅值，观察方波频率是否符合精度要求，不符合再进行调整。

### 3 电路波形截图

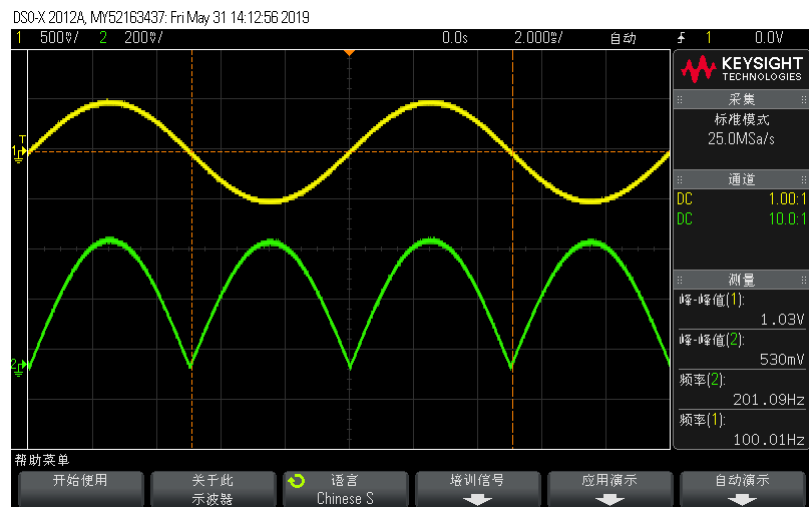


图 10 精密整流部分输出

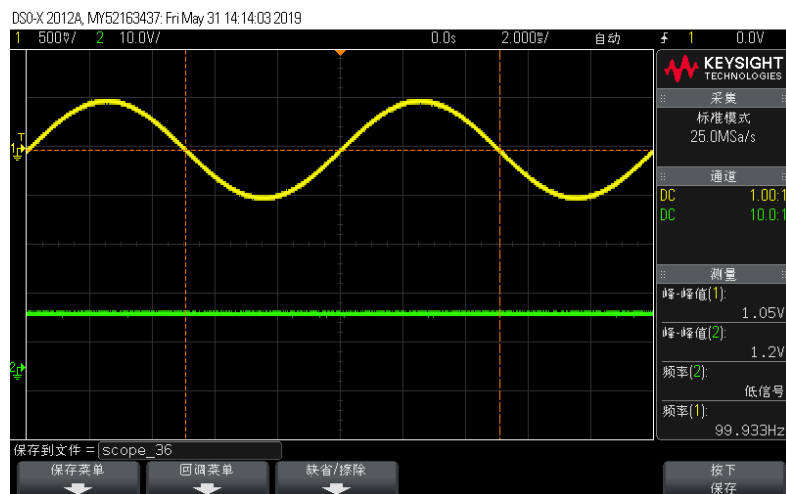


图 11 低通滤波部分输出

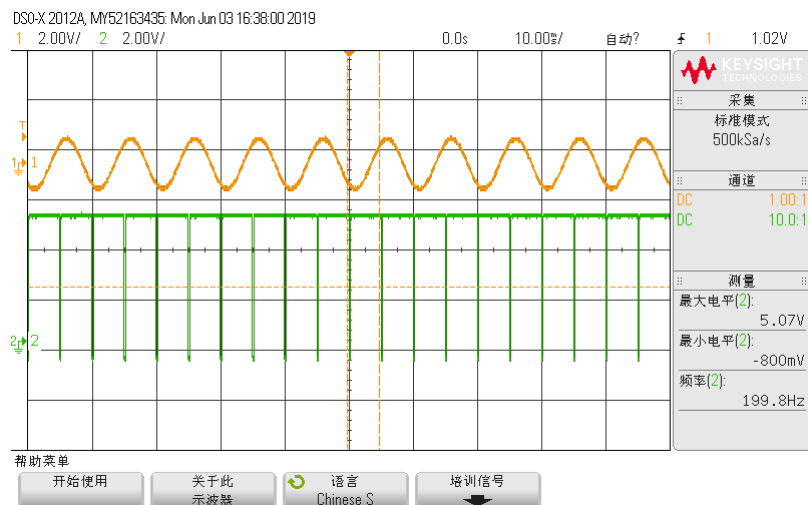


图 12 必做 (2V~199.8Hz)

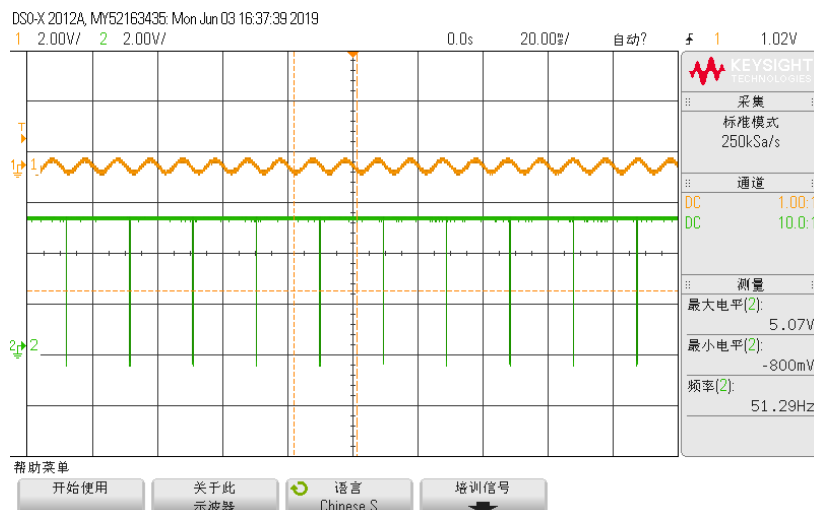


图 13 选做 (0.5V~51.29Hz)

## 4 实验数据处理

### 4.1 实验必做 1-5V

在输入正弦波幅值 1-5V 内选取 10 个电压值进行测量，数据记录如下表，数码管示数与输入电压幅值的关系曲线如图 14 所示。

$U_i/V$	1	1.5	1.8	2	2.6	3
示数	1.06	1.58	1.88	2.08	2.68	3.06
相对误差	6%	5.3%	4.4%	4%	3.1%	2%
$U_i/V$	3.2	3.8	4	4.2	4.6	5
示数	3.23	3.79	3.99	4.09	4.41	4.78
相对误差	0.94%	0.26%	0.25%	2.6%	4.1%	4.4%

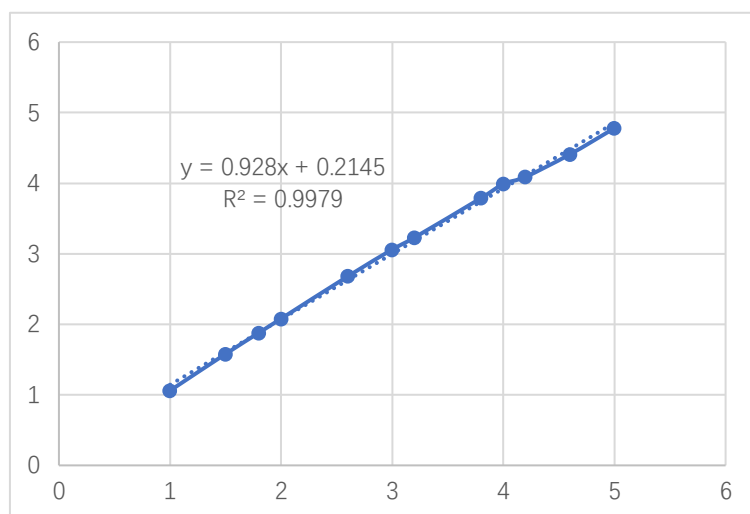


图 14 示数~ $U_i$

可以看到，数码管示数与测量的电压幅值呈较好的线性关系，相对误差都控制在了 8% 以内，做相对误差和输入电压幅值的关系曲线如图 15，误差在两端，即 1V 和 5V 附近



较大，在 3-4V 左右较小，误差可能主要来源于模拟电路中的压频转换部分，如电阻、电容值不精确等，另外计算输出方波周期时忽略了 RC 放电时间，可能对实际精度造成影响。

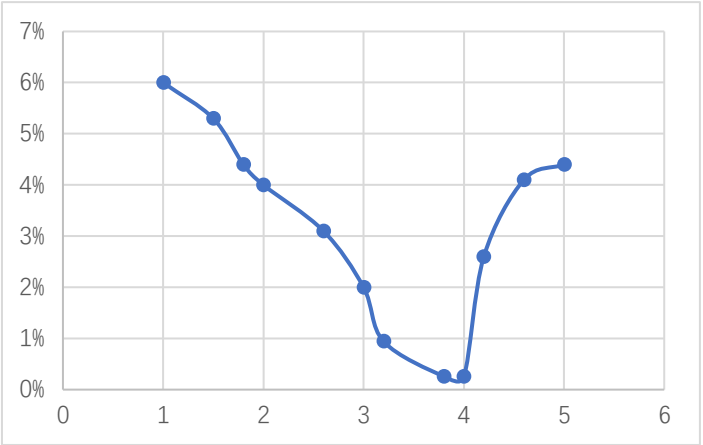


图 15 相对误差~ $U_I$

#### 4.2 实验选做 0.1-1V

修改电路参数，输入正弦波幅值在 0.1-1V 内变化，选取 10 个电压值进行测量，数据记录如下表，数码管示数与输入电压幅值的关系曲线如图 16 所示。

$U_I/V$	0.1	0.2	0.3	0.35	0.4	0.5
示数	0.09	0.19	0.30	0.35	0.40	0.51
相对误差	10%	5%	0	0	0	2%
$U_I/V$	0.54	0.6	0.67	0.7	0.8	0.9
示数	0.55	0.61	0.68	0.72	0.82	0.92
相对误差	1.8%	1.7%	1.5%	2.9%	2.5%	2.2%

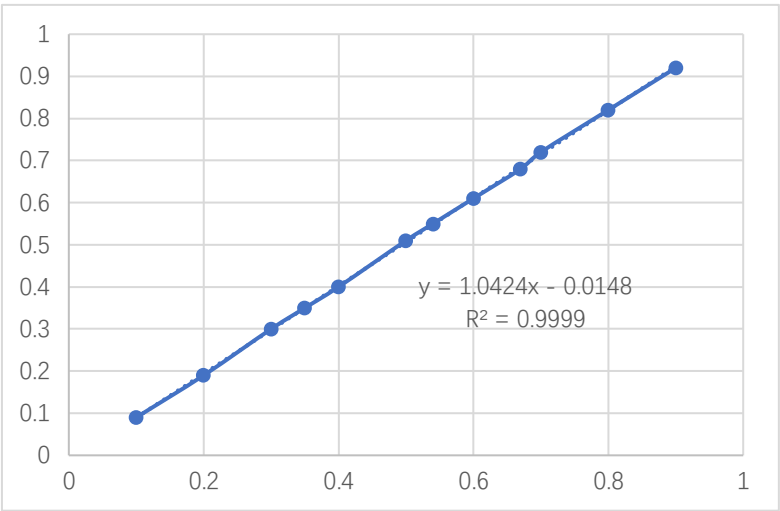


图 16 示数~ $U_I$

可以看到，数码管示数与测量电压幅值呈很好的线性关系，相关系数达到 0.9999，排除 0.1V 一点，其余电压值下精度都很高，误差来源同样要考虑压频转换部分的元件参数，要继续提高电压表精度，若难以从模拟电路部分下手，可以修改数字电路的代码，增加电压表显示位数，或是在现有计数程度上手动加 1，都能够在保证准确性的前提下进一步减小相对误差。

## 5 电路故障及原因

### • 数字电路部分

本次实验的数字电路部分要实现对于输入信号频率的测量，整体而言不是很困难，需要注意的是计算频率时可能出现无法整除等问题，得到的数值有波动，若不加处理，显示时会在数码管上出现重影，不能清晰地显示数字，因此加入数据更新环节，每 1 秒更新一次频率值，1 秒内保持一个固定值不变，这样能够数码管保证显示的稳定性。另外，在初次实验中，我观察到显示频率会时不时地跳动，后来发现是 FPGA 未与学习机共地的缘故，接上地线后显示稳定。

### • 模拟电路部分

模拟部分的电路较为复杂，本次实验中我的主要问题在于选做部分精度始终达不到要求，最初在保证了 0.1V 的精度时，0.9V 的相对误差达到了 20% 左右，一开始我更换了多处的电阻，希望能找到合适的参数取值，但由于元件盒中的电阻阻值有限，而且元件参数对于压频转换的输出是牵一发而动全身的，很难调到满意的情况，后来在老师的帮助下，我确定了影响输出方波频率最主要的两个电阻（即  $R_W$  和  $R_{15}$ ），固定其他电阻在合适的值（基本维持必做任务时的电路不变），用滑动变阻器调节两个电阻的值，逐渐逼近理论值，减小测量的相对误差，最终除了 0.1V 附近值，其余电压值的相对误差都基本降到了 2% 及以下，对于 0.1V 处的误差，从调整电路参数方面入手实在不易，可以考虑修改数字电路部分，如增加频率位数等。

另外，在实验中我发现输出方波上下边沿不平整，有一定倾斜，更换稳压管后解决了问题；以及有一次上电之后，发现各级输出信号噪声都很大，检查地线接触良好，后来发现是信号发生器的输出不稳定，于是更换了另一台仪器。

可以感受到综合实验的调试是一个需要整体考虑的事情，可能每一个部分单独是好的，连接在一起就出现问题，因而输出得不到期望的结果，仅关注某一个部分是不行的，应通篇思考，再抓住关键，整个调试过程中可能出很多 bug，但静下心来按照原理慢慢尝试，总会得到理想的结果。

## 6 思考题

### （1）如果调试中出现数码管显示不稳定的现象应如何消除？

数码管显示不稳定可能有多种原因，若数字部分程序设计中未在计数时做同步处理，每次计算得到的频率值可能不同，导致显示不稳定，可以将输入信号、计数变量、晶振时钟设置为同步起止的，或是加入数据更新环节，定期（如 1 秒）更新一次频率值，在下 1 秒中保持新频率值不变，这样可以使显示变得稳定；数码管位选信号的时钟从晶振分频获得，此时钟也要快慢适当；另外，若在实验中发现数据跳变，应检查地线是否接触良好，是否共地。

### （2）u-f 转换电路的转换误差取决于哪些因素，为什么？

压频转换电路的输出电压频率表达式为

$$f = \frac{R_{15}}{2R_{14}R_WCU_Z} \cdot |u_I|$$

可以看到转换精度与几个电阻的电阻值和电容容值相关，经过实验中的尝试，调节  $R_W$ （压频电路输入端电阻）、 $R_{15}$ （第二个运放正极和输出端间电阻）能较好的控制输出方波的频率值，减小转换误差。由于该式成立的条件是  $R_W \gg R_{17}$ ，而在实验中该不等式不能很好地

满足 ( $R_W$  为几到十几千欧,  $R_{17}$  约 1 千欧), 电容放电过程的时间不能忽略, 因此会导致一定的误差, 使得到的频率与输入电压幅值线性关系不好。另外, 电路中元件参数的稳定性、与理论值的误差也是降低精度的原因。