

## 实验一 计量器具（电子秤）模拟通道（实验报告格式）

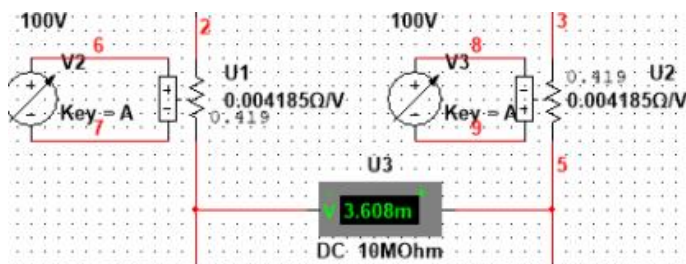
班级 信安 2101 班 姓名 孙照海 学号 202109070105

### 一、实验目的

1. 掌握金属箔式应变片的应变效应，电桥的工作原理。
2. 学会使用应变片原理建立电子称传感器模型。
3. 学会设计电桥、滤波器和放大器。
4. 学会使用模数转换器。
5. 加深对基本原理的认识，提升设计能力。

### 二、实验内容

1. 用压控电阻模拟电阻应变片，设计电桥，使电桥的输出与压控电阻的控制电压成正比，采用电压表测电桥输出端的电压。



压控电阻的位置：点击 view--Toolbars--Virtual，然后会跳出一个工具栏，找到电阻，最下面一个就是压控电阻

压控电阻控制电压（DC\_INTERACTIVE\_VOLTAGE）的位置：点击 place 菜单—>component—>弹出菜单的左上角 database 选 master database，下边的 group 选 sources，再下边的 family 选 signal voltage sources，再选 DC\_INTERACTIVE\_VOLTAGE 即可。

DC\_INTERACTIVE\_VOLTAGE 的使用：单击按键可在仿真过程中按事先设定的比例增加或减少电压值，如 Key=A，那么单击 A 可以增加电压，shift+A 可以减少电压。

2. 运用 OPAMP\_3T\_VIRTUAL 设计放大电路，要避免电桥对放大电路的影响，使电桥输出放大 100 倍，采用电表或探针测放大器输出电压。
3. 对放大器输出引入热噪声 THERMAL\_NOISE，再采用有源滤波器进行滤波，采用双通道示波器或四通道示波器对比滤波前后的电压波形。

THERMAL\_NOISE 的  $V_{rms}$  为：

$$V_{rms}(B) = \text{Noiseratio} \times \sqrt{4kTRB}$$

其中：k=Boltzmann's Constant=1.380649 × 10<sup>-23</sup>J/K，温度 T 单位为开尔文

THERMAL\_NOISE 的位置：点击 place 菜单—>component—>弹出菜单的左上角 database 选 master database，下边的 group 选 sources，再下边的 family 选 signal voltage sources，再选 thermal noise 即可。

4. 运用 ADC（或者采用积分方法自行设计 AD 转换器）将放大电路的输出转换成数字信号，并进行显示

### 三、电子秤模拟通道的设计实现

#### 1、电桥的设计实现（从设计原理到具体实现展开介绍）

设计原理：

电阻应变片的工作原理是电阻应变效应，即在导体产生机械变形时，它的电阻值相应发生变化。应变片是由金属导体或半导体制作的电阻体，其阻值随着压力所产生的变化而变化。对于金属导体，电阻变化率  $\Delta R/R$  的表达式为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx (1 + 2\mu)\epsilon$$

式中， $\mu$  为材料的泊松系数， $\epsilon$  为应变变量。

通常把单位应变所引起电阻相对变化称作电阻丝的灵敏系数，对于金属导体，其表达式为

$$k_0 = k_0 = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = (1 + 2\mu)$$

所以

$$\frac{\Delta R}{R} = k_0 \varepsilon$$

在外力作用下，应变片产生变化，同时应变片电阻也发生相应变化。当测得阻值变化为 $\Delta R$ 时，可得到应变值 $\varepsilon$ ，根据应力和应变关系，得到应力值为

$$\sigma = E \varepsilon$$

式中， $\sigma$ 为应力， $\varepsilon$ 为应变值（为轴向应变），E 为材料的弹性模量（ $kg/mm^2$ ）。

重力 G 与应力 $\sigma$ 的关系为

$$G = mg = \sigma S$$

式中，G 为重力，S 为应变片截面积。

根据以上各式可得到

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k_0}{ES} mg$$

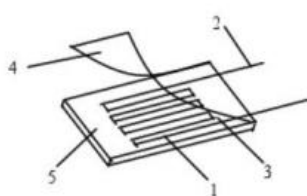
由此便得出了应变片电阻变化与重物质量的关系，即

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k_0}{ES} g R m$$

根据应变片常用的材料（如康铜）取 $k_0 = 2$ ， $E = 16300 kg/mm^2$ ， $S = 1 cm^2 = 100 mm^2$ ， $R = 348 \Omega$ ， $g = 10.8 m/s^2$

$$\Delta R = [(2 \times 9.8 \times 348) / (16300 \times 100)] m = 0.004185 m$$

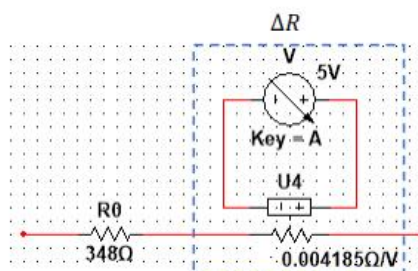
所以在 Multisim 中可以建立以下模型来代替应变片进行仿真，如下图所示



电阻应变片

1-敏感栅；2-引线；3-粘结剂；

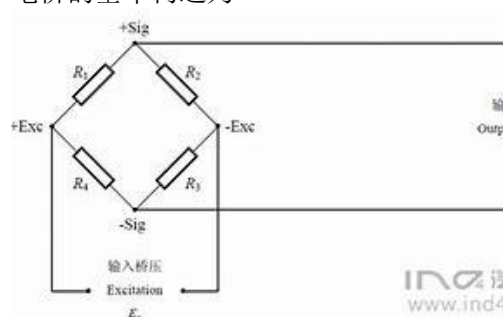
4-覆盖层；5-基底



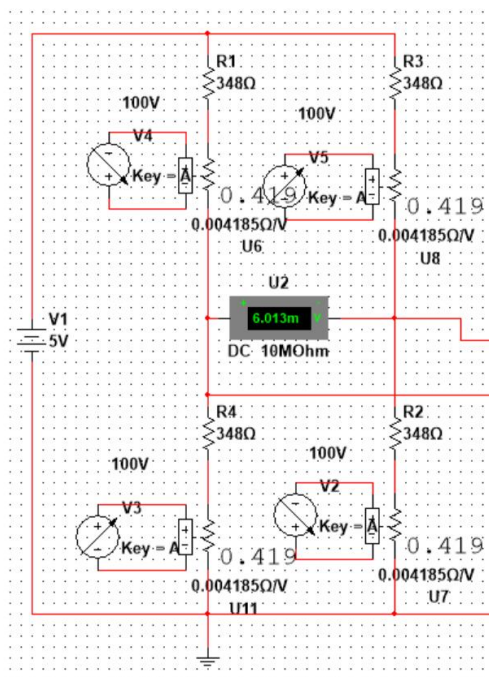
图中，R1 模拟的是不受压力时的电阻值 R0，压控电阻用来模拟电阻值的变化，V 可理解为重物的质量 m (kg)。当 V 反接时，表示受力相反。

### 具体实现

电桥的基本构造为



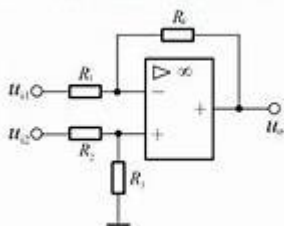
由讨论课内容可知，当使用 4 个压控电阻时电桥电压的灵敏度最高，所以连接 4 个压控电阻，并将每个压控电阻的电阻值设为  $0.004185 \Omega/V$ ，最大电压设置为 100V，且相邻的两个压控电阻反接。实际电路如下图：



## 2、放大电路的设计实现（从设计原理到具体实现展开介绍）

### 设计原理

想要将电桥的输出电压放大 100 倍，可以通过一个减法放大器来实现。为减小放大器对电桥电路的影响，先将电桥的输出端连上两个电压跟随器进行隔离，再连接一个减法放大器，减法放大器的电路原理如下图所示：

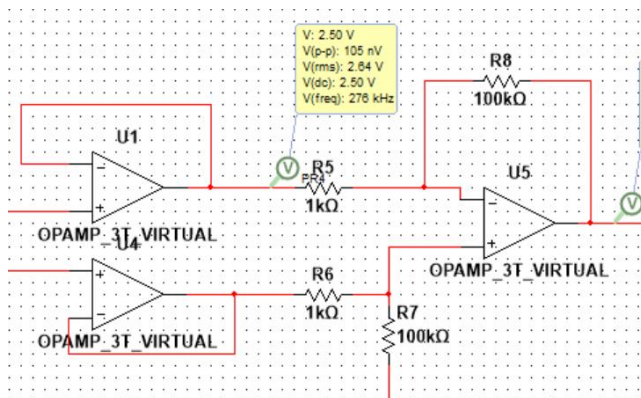


$$\text{若 } \frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}, \text{ 则 } V_o = \frac{R_4}{R_1} (U_{i2} - U_{i1})$$

所以只需调整反向放大器电阻阻值使  $\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} = 100$  即可实现减法放大电路的功能。

### 具体实现

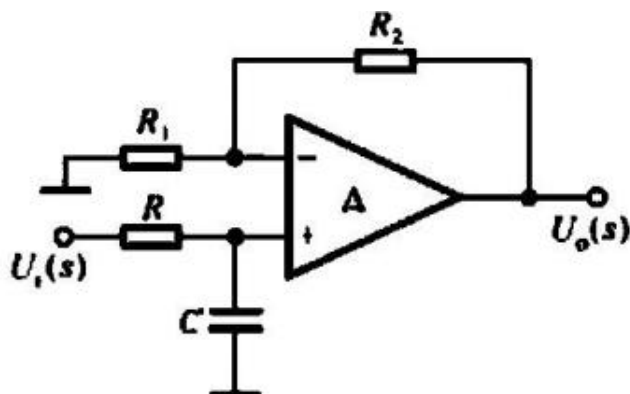
从电桥的两个输出端连入两个电压跟随器，两个电压跟随器的输出端连入放大电路的两个输入端，其中  $R_4$  取值  $1\text{k}\Omega$ ， $R_1$  取值  $10\Omega$ ，其比值正好为 100，正相输入端的  $R_3$  为  $1\text{k}\Omega$ ， $R_2$  为  $10\Omega$ 。故可以实现 100 倍的放大电路。其实际电路图如下：



## 3、滤波器的设计实现（从设计原理到具体实现展开介绍）

## 设计原理

通过同相低通滤波器将高频的噪声滤去，电路图如下图所示：



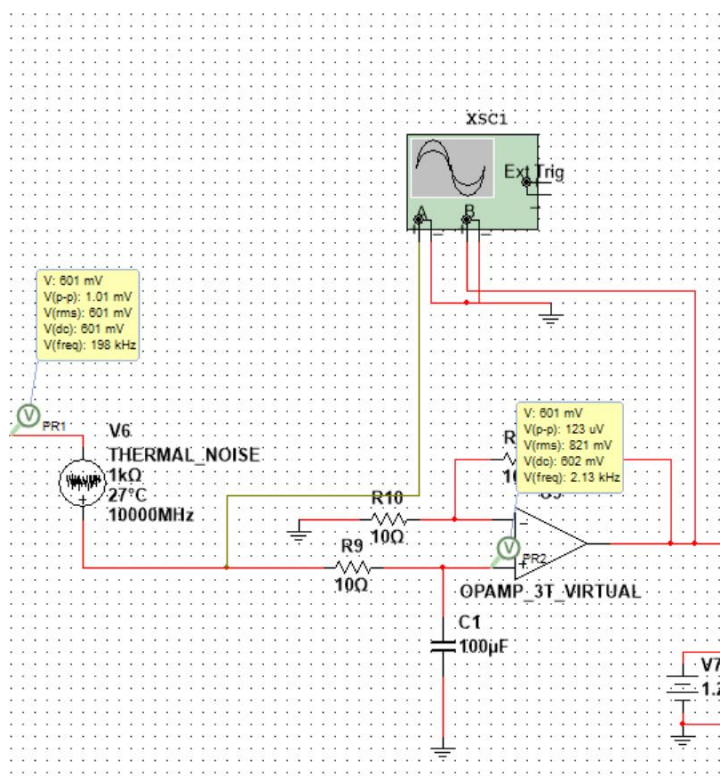
$$\text{其传递函数为: } H(\omega) = \frac{U_o}{U_+} \cdot \frac{U_+}{U_s} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$\text{通带放大倍数为: } 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

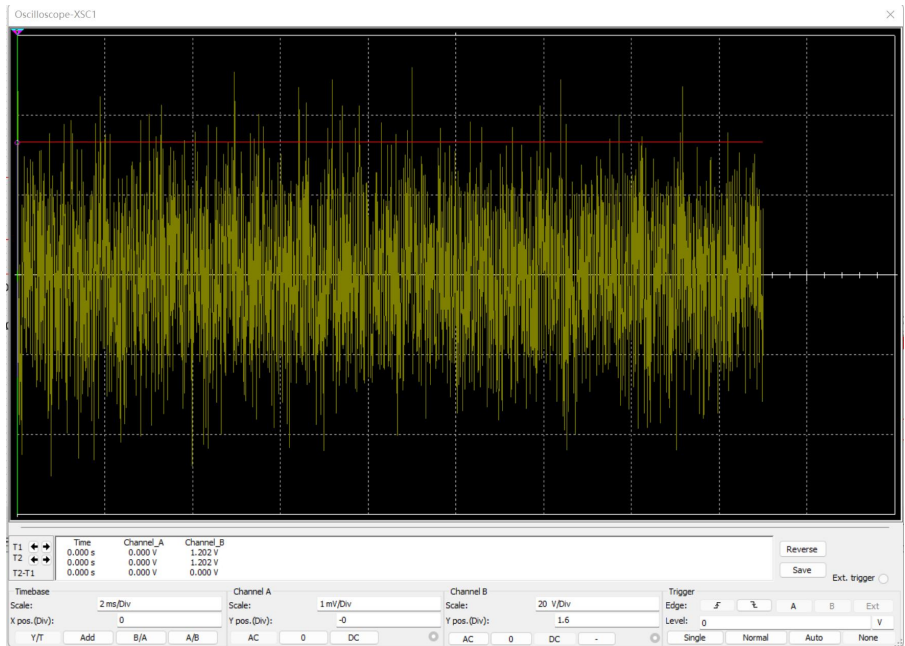
$$\text{通带截止频率为: } \omega_c = \frac{1}{RC}$$

## 具体实现

由电路图可得，滤波器的通带放大倍数为  $1 + \frac{R_2}{R_1}$ ，放大倍数不宜过高，故可令  $R_2 = R_1 = 10 \Omega$ ，即滤波器的放大倍数为 2 倍。由于噪声源的频率很高，要过滤掉高频率的噪音（10000MHz），则截止频率需要比该频率低，即  $\omega_c = \frac{1}{RC}$  要比该噪音频率小，故可令 C 为 100uF，R 为 10  $\Omega$ 。经过检验，发现此滤波器的滤波效果很好。具体电路图为：

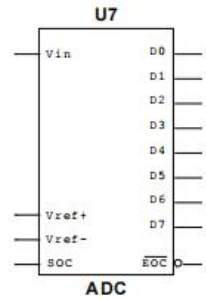


示波器显示图像为：

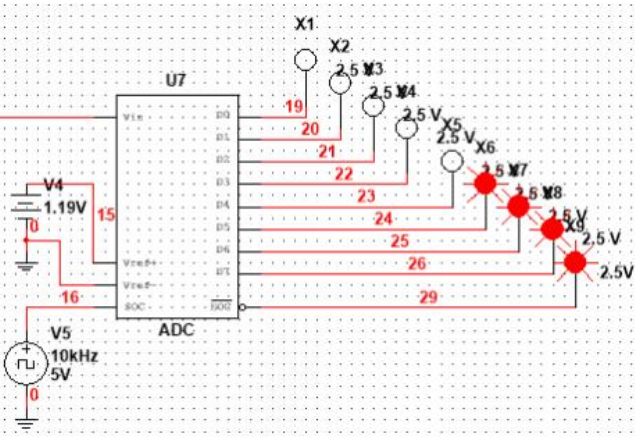


4、模/数转换 ADC 的实现（从具体实现展开介绍）

在 Mixed 库下 ADC-DAC 中有 8 位和 16 位的模数转换器(ADC), 接下来以 8 位 ADC 为例介绍它的使用。

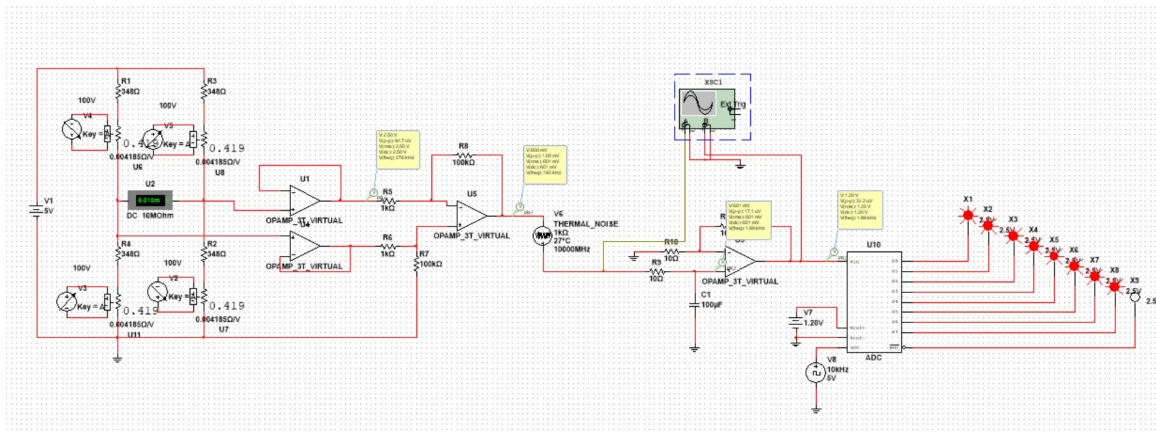


Vin 为输入引脚，接转换的模拟量  
Vref+和 Vref-引脚之间电压成立满量程电压。满量程电压由下式给出：  
 $V_{ref} = V_{ref+} - V_{ref-}$   
SOC 是开始转换的输入，上升沿有效  
EOC 为输出引脚，输出低电平，指示转换结束  
D0 到 D7 为输出引脚，输出模拟量转换的 8 位二进制数。





## 5、模拟通道的完整电路图



## 四、实验数据记录

表一 电桥电路测试结果记录表

电桥电压/V	控制电压/V	变化的电阻（一个）/ $\Omega$	电桥输出电压/mV
5	100	0.4185	6.013
	70	0.29295	4.209
	50	0.20925	3.006

结论：电桥的输出电压与控制电压成正比。当控制电压增大时，电桥输出电压也增大，电压取最大值时输出电压为 6.013mV。

表二 放大电路测试结果记录表

电桥输出电压/mV	放大电路 4 个电阻值/ $\Omega$	运放输出电压
6.013	1k,100k,1k,100k	601mV
	500,100k,500,100k	1.2V
	500,200k,500,200k	2.4V

结论：放大电路的输出电压为  $V_{out} = V_{in} \frac{R2}{R1}$

表三 滤波电路测试结果记录表

运放输出电压	THERMAL NOISE				滤波器参数设定		滤波器输出电压
	Noise ratio	R/ $\Omega$	T/ $^{\circ}\text{C}$	B/MHz	R (R 的个数 滤波器决定)	C/ $\mu\text{F}$	
601mV	2	1k	27	10000	10	100	1.20V
	4	2k	27	10000	100	100	1.20V
	10	5k	27	10000	1000	100	1.20V
	30	10k	27	10000	10000	100	1.20V

结论：当截止频率  $\frac{1}{RC}$  比 THERMAL NOISE 噪声频率低时，高频噪音会被低通滤波器滤去，因而噪音对滤波器的输出电压几乎完全没有影响。

表四 模数转换器(ADC)测试结果记录表

Vin	Vref+ Vref- 间电压	SOC	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
1.20V	1.20V	5V	1	1	1	1	1	1	1	1
962mV			1	1	0	0	1	1	0	1
781mV			1	0	1	0	0	1	1	0
601mV			1	0	0	0	0	0	0	0

结论：D0 到 D7 对应一个八位二进制数，该数为  $\frac{V_{in}}{V_{ref+}-V_{ref-}} * 255$  所得十进制数的二进制值。

从而将电压模拟信号转化数字信号。

### 五、思考题

#### 1、电桥电压的大小范围吗？为什么？

有范围，因为电桥的输出和电桥电压成正比，过大会导致后续放大器不精准，过小会导致输出不精准。

#### 2、模数转换器 ADC 是如何实现的？

ADC 的基本转换原理分为四个过程：

- ①抗混叠滤波 (Anti-aliasing)，可以理解为一个低通滤波器
- ②采样保持电路 (Sample and hold)
- ③量化 (Quantizer)
- ④编码 (Coder)

#### 采样保持

所谓采样就是将一个时间上连续变化的模拟量转化为时间上离散变化的模拟量。将采样结果储存起来，直到下次采样，这个过程叫作保持。

#### 量化和编码

模拟信号通过 ADC 转换成数字信号的这一过程称为量化，由于量化输出的数字信号位数有限，所以输出的数字信号和你采样得到的模拟信号会有一个误差，被称为量化误差，对于一个 N 位 ADC 来说，假设其满量程电压为  $V_{ref}$ ， $V_{ref}$  被 ADC 分为  $2^N$  个区间，区间宽度用 LSB (last significant bit) 表示  $LSB = V_{ref}/2^N$ 。

例如： $V_{ref}=8V$ ，ADC 为 3 位， $LSB=1$ ，所以每个区间为 1V，

000 代表电压  $0 \leq V < 1$

001 代表电压  $1 \leq V < 2$

010 代表电压  $2 \leq V < 3$

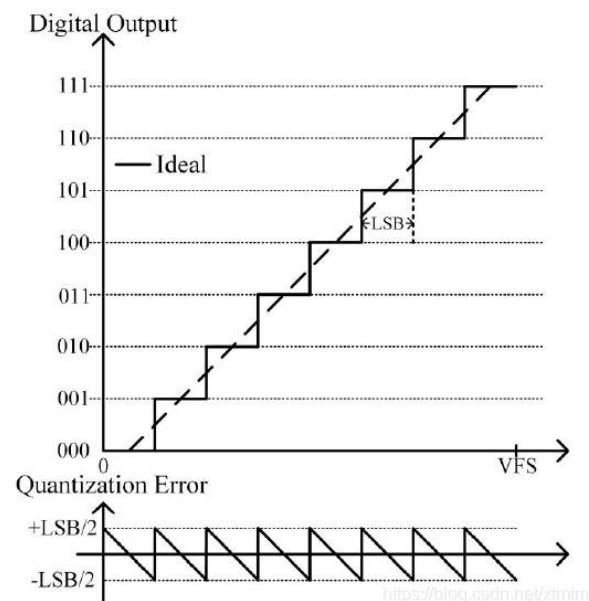
011 代表电压  $3 \leq V < 4$

100 代表电压  $4 \leq V < 5$

101 代表电压  $5 \leq V < 6$

110 代表电压  $6 \leq V < 7$

111 代表电压  $7 \leq V < 8$



此 ADC 的分辨率为 1V

#### 3、电子秤模数转换器（ADC）8 位的输出与压控电阻的控制电压是什么关系？为什么？

正比关系。

$$\frac{V_{in}}{V_{ref}} = \frac{\text{二进制输出转化为十进制的数}}{255}$$

由运放的放大关系得：

$$V_{in} = 200\Delta U$$

由电桥电路性质得：

$$\Delta U = \frac{U_s}{R} * U * 0.004185 \approx 0.00006013 * U$$

故电子秤模数转换器（ADC）8 位的输出与压控电阻的控制电压成正比关系

## 六、实验总结、心得体会及建议

1、从需要掌握的理论、遇到的困难、解决的办法以及经验教训等方面进行总结。

通过本次实验，掌握了电桥电路，滤波器，放大电路和模数转换器的设计原理，了解了设计构造出一个电子秤模拟电路的基本原理和步骤。实验过程中遇到了很多困难，比如如何调整滤波器参数过滤掉噪音，以及 ADC 的参考电压与输入电压的关系，这些是平时学习中比较欠缺的。但是通过上网搜寻资料和询问老师同学后解决了问题。

2、对本实验内容、过程和方法的改进建议（可选项）。

无。