

实验一 计量器具（电子秤）模拟通道

班级 智能 2103 姓名 姚丁钰 学号 202107030125

一、实验目的

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

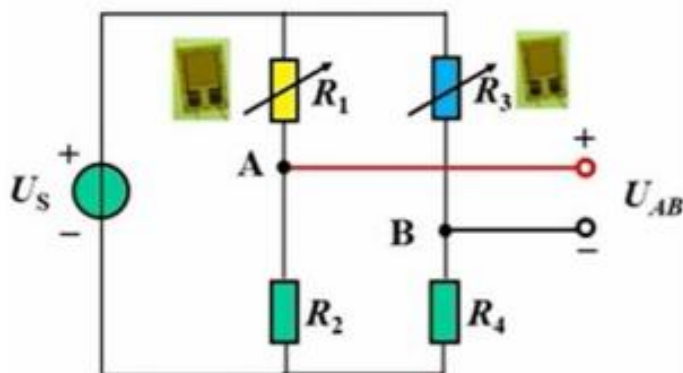
二、实验内容

- 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例，采用电压表测电桥输出端的电压。
- 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。
- 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。
- 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】



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

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

式中， μ 为材料的泊松系数， ε 为应变量。

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

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

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 ΔR 时，可得到应变值 ε ，根据应力和应变关系，得到应力值为

$$\sigma = E\varepsilon$$

式中， σ 为应力， ε 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 σ 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

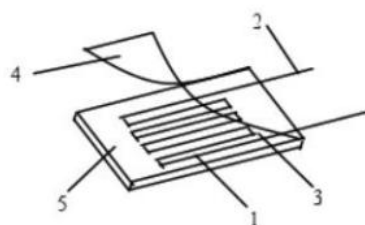
$$\Delta R = \frac{k_0}{ES} g R m$$

根据应变片常用的材料（如康铜）

$$k_0 = 2, E = 16300 \text{ kg/mm}^2, S = 1 \text{ cm}^2 = 100 \text{ mm}^2, R = 348, g = 10.8 \text{ m/s}^2$$

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

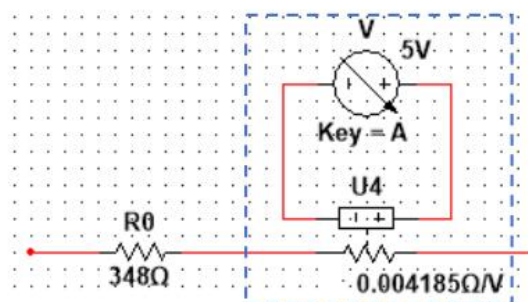
在 Multisim 中对左下图的应变片可以采用下图所示模型来代替应变片进行仿真。



电阻应变片

1-敏感栅；2-引线；3-粘结剂；

4-覆盖层；5-基底



电子秤的电桥电路分别用 1 个压控电阻、2 个压控电阻、3 个压控电阻、4 个压控电阻实现，写出了每种实现的 U_{AB} 输出表达式，发现用 4 个压控电阻实现的电桥电压的灵敏度（ $S = V/\Delta R$ ）高。

$$U_0 = U_b - U_d = U_i \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U_i \frac{R_1 R_3 - R_4 R_2}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

$$\text{令 } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad R_i \text{ 为增量 } \Delta R_i$$

$$U_0 = U_i \frac{(R_i + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_4 + \Delta R_4)(R_2 + \Delta R_2)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)}$$

使输出电压不等于 0，如果邻臂同号，则输出电压会等于 0

$$\Delta R_1 = -\Delta R_2, \Delta R_4 = -\Delta R_3$$

$$U_0 = U_i \frac{R(\Delta R_3 - \Delta R_2) + \Delta R_1 R - \Delta R_4 R}{4R^2} = \frac{U_i}{4} \frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{R}$$

至此，准备工作完成，下面分别求 1，2，3，4 个压控电阻如下：

U_0 表达式及灵敏度： $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ， $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 = -\Delta R_4$

1. R_1 为压控电阻 $\Delta R_1 \neq 0$ ， $\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$

$$U_0 = \frac{U_i \Delta R_1}{4R_1}$$

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta R} = \frac{U_i}{4R_1}$$

2. R_1 、 R_2 为压控电阻， $\Delta R_1 = -\Delta R_2 \neq 0$ ， $\Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$

$$U_0 = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{U_i}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta R} = \frac{U_i}{2} \frac{1}{R}$$

3. R_1 、 R_2 、 R_3 为应变片， $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 \neq 0$ ， $\Delta R_4 = 0$

$$U_0 = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{3U_i}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta R} = \frac{3U_i}{4} \frac{1}{R}$$

4. R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为应变片， $\Delta R_1 = -\Delta R_2 = \Delta R_3 \neq 0$ ， $\Delta R_4 = 0$

$$U_0 = \frac{U_i}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = U_i \frac{\Delta R}{R}$$

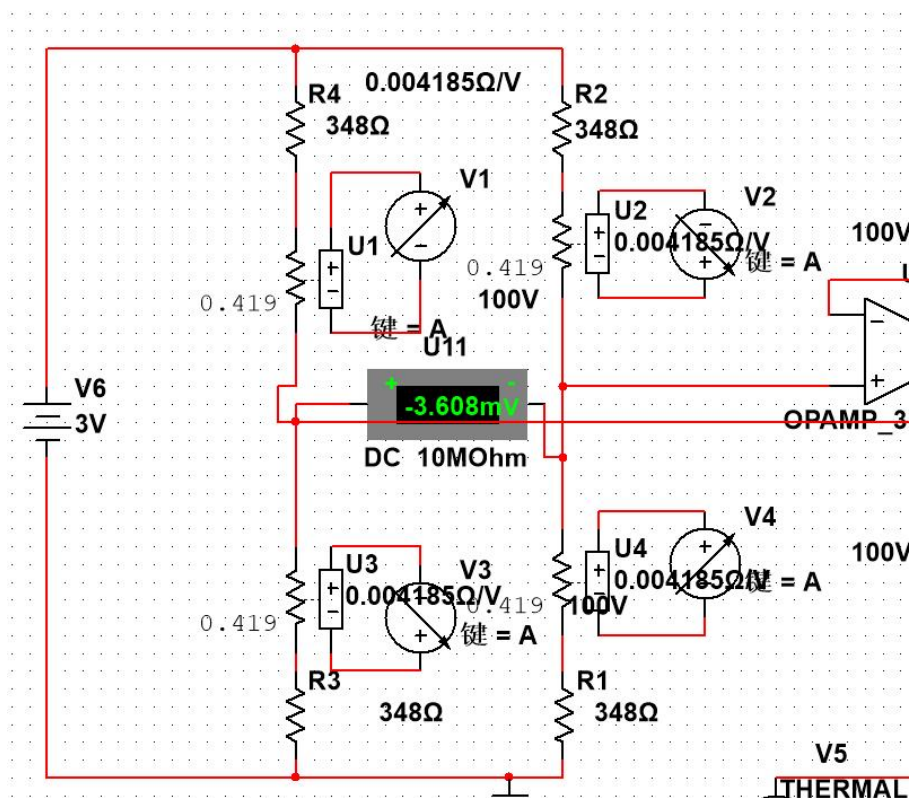
$$S = \frac{\Delta U}{\Delta R} = U_i \frac{1}{R}$$

综上，使用四个压控电阻实现电桥电压的灵敏度最高

【具体实现】

用压控电阻和阻值为 348 欧的电阻一起模拟应变片，设计电桥，使电桥的输出与压控电阻的控制电压成正比例，采用电压表测电桥输出端的电压。

模型中， R_1, R_2, R_3, R_4 模拟的是应变片不受压力时的电阻值，压控电阻用来模拟应变片受压力时电阻值的变化，电压 V 代替重物的质量 m (kg)。当 V 正接时，表示应变片受外力拉伸，电阻值变大；当 V 反接时，表示应变片被压缩，受力相反，电阻值变小。

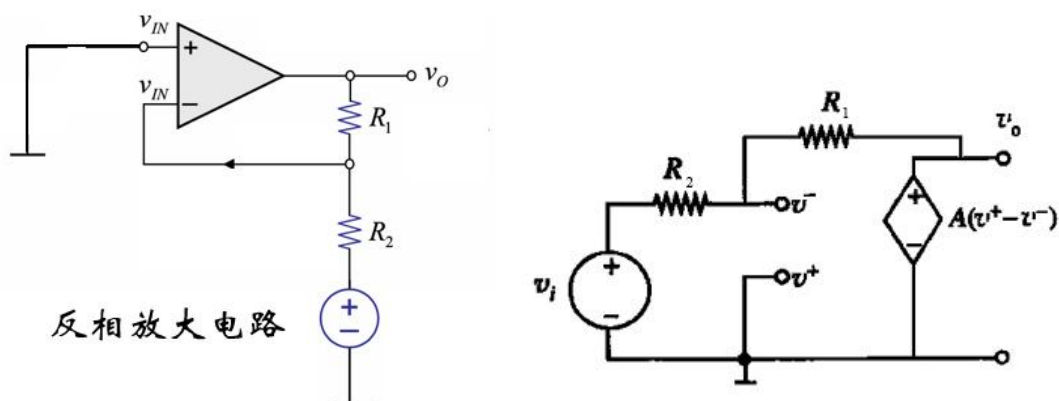


由于电桥接入四个压控电阻，电桥的灵敏度最高，于是按照电压和重量之间的转换关系设置电阻电压值，R1-R4 取 $348\ \Omega$ 模拟的是不受压力时的电阻值，连入四个压控电阻压变电阻的数值为 $0.004185\ \Omega/V$ ，压控电压的满量程设置为 100V。

➤ 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】

由于后续的负载会影响从电桥处获得的电压差，因此将一个电气系统与另一个电气系统隔离的一种方法电路时电压跟随器：使得放大电路不会对电桥的输出造成影响，从而可以减小放大倍数的误差。然后接入反相放大器对电压差进行放大。



写出节点 v_o 、 v^+ 和 v^- 的 KCL 方程，并求出 v_o

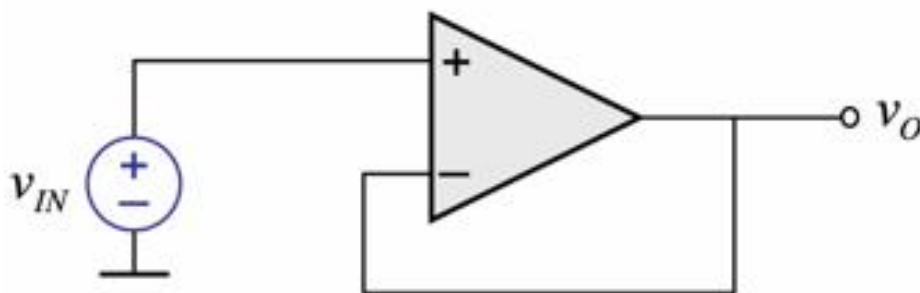
$$v_o = A(v^+ - v^-), v^+ = 0$$

$$\frac{v_i - v^-}{R_2} + \frac{v_o - v^-}{R_1} = 0$$

$$v_o = \frac{-AR_1/(R_2 + R_1)}{1 + AR_2/(R_2 + R_1)} v_i$$

近似处理：当 A 很大时， $v_o \approx -\frac{R_1}{R_2} v_i$

结论：放大电路（闭环）增益 v_o/v_i 仅由外部电阻决定。

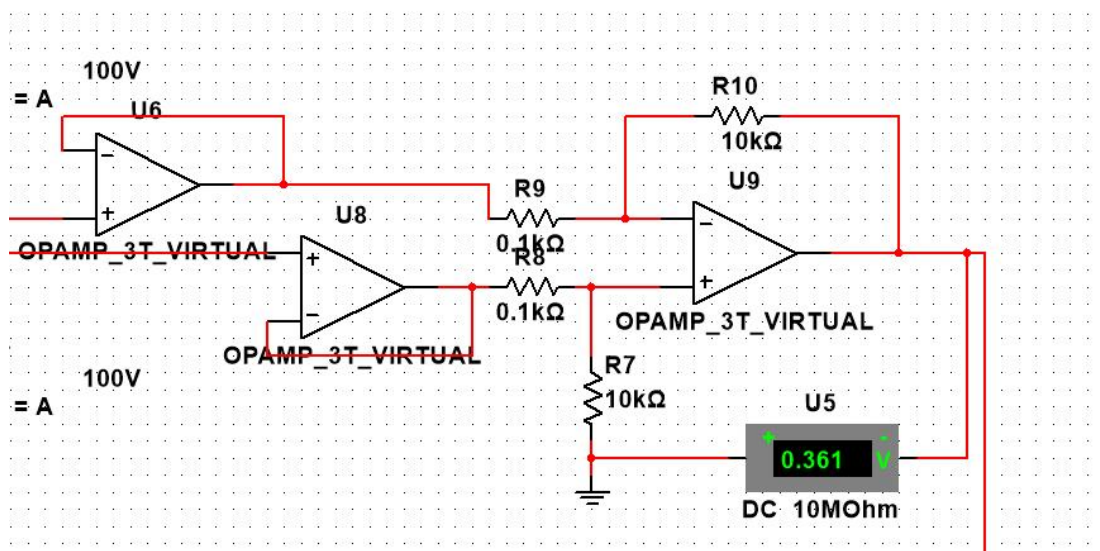


电压跟随器：增益为 1，减小电桥对放大器的影响。

【具体实现】

运用 Virtual3-Terminal Opamp 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。

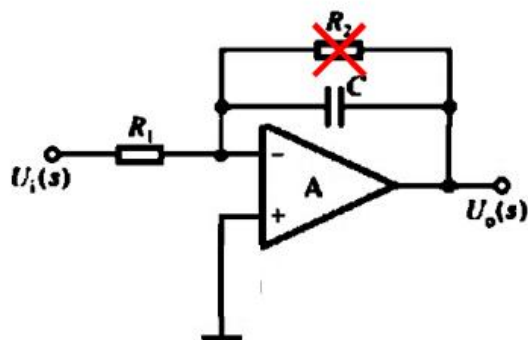
其中反相输入端的 R1 取值 0.1kΩ，R2 取值 10kΩ，其比值正好为 100，正相输入端的 R4 为 0.1kΩ，R3 取值 10 kΩ，故可以实现放大 100 倍的电路。放大器放大后的电压是 0.361V，相比原来的 3.608mV，放大了 100 倍。



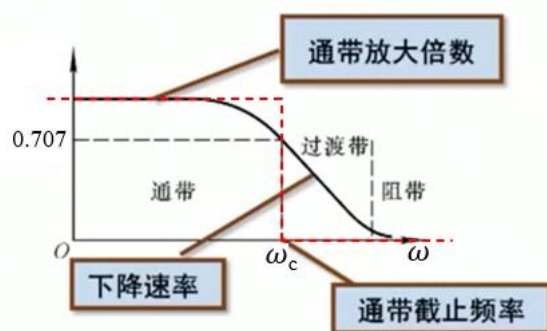
➤ 3、滤波器的设计实现（从设计原理到具体实现展开介绍）

【设计原理】

可以设计一个反向低通滤波器实现



$$\text{频率响应} = -\frac{\frac{R_2}{R_1}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$



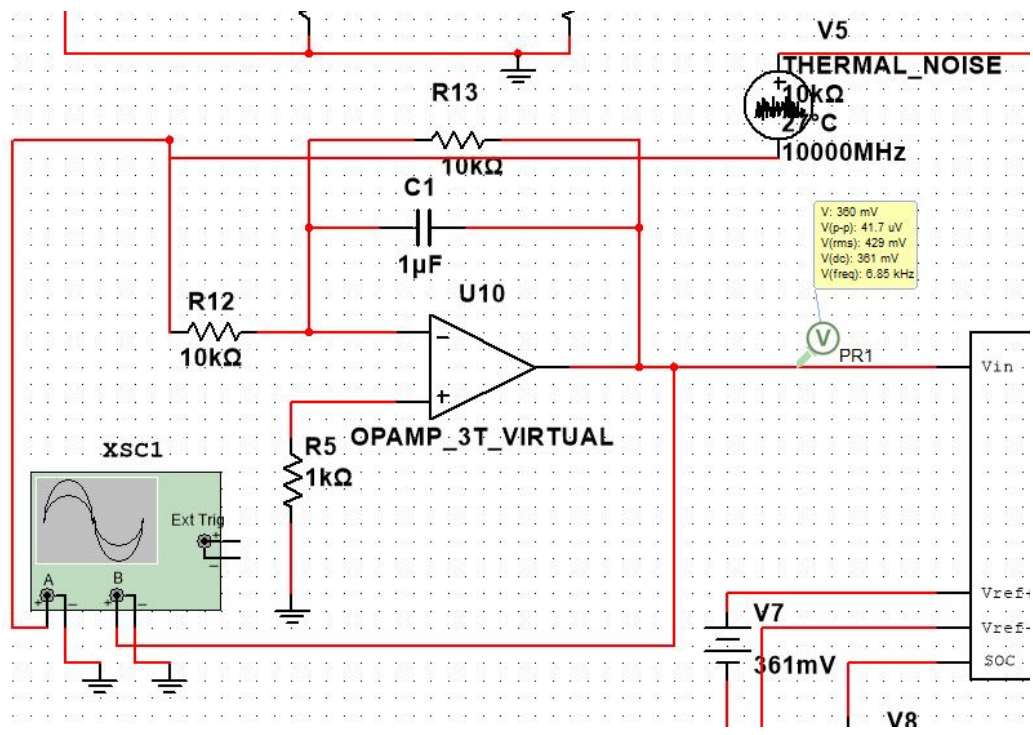
- ✧ 对放大器输出引入热噪声，加入的噪声是高频率电压。
- ✧ 采用反向低通滤波器，只通过频率低的信号，过滤掉高频的噪音。
- ✧ 由于噪声源的频率很高，要过滤掉高频率的噪音，则截止频率需要很高。
- ✧ 滤波器只需要过滤掉噪音即可，不需要对信号实现增益效应，因此两个电阻的阻值相等。

THERMAL_NOISE 的 V_{rms} 为：

$$V_{rms}(B) = Noise_{ratio} \times \sqrt{4kTRB}$$

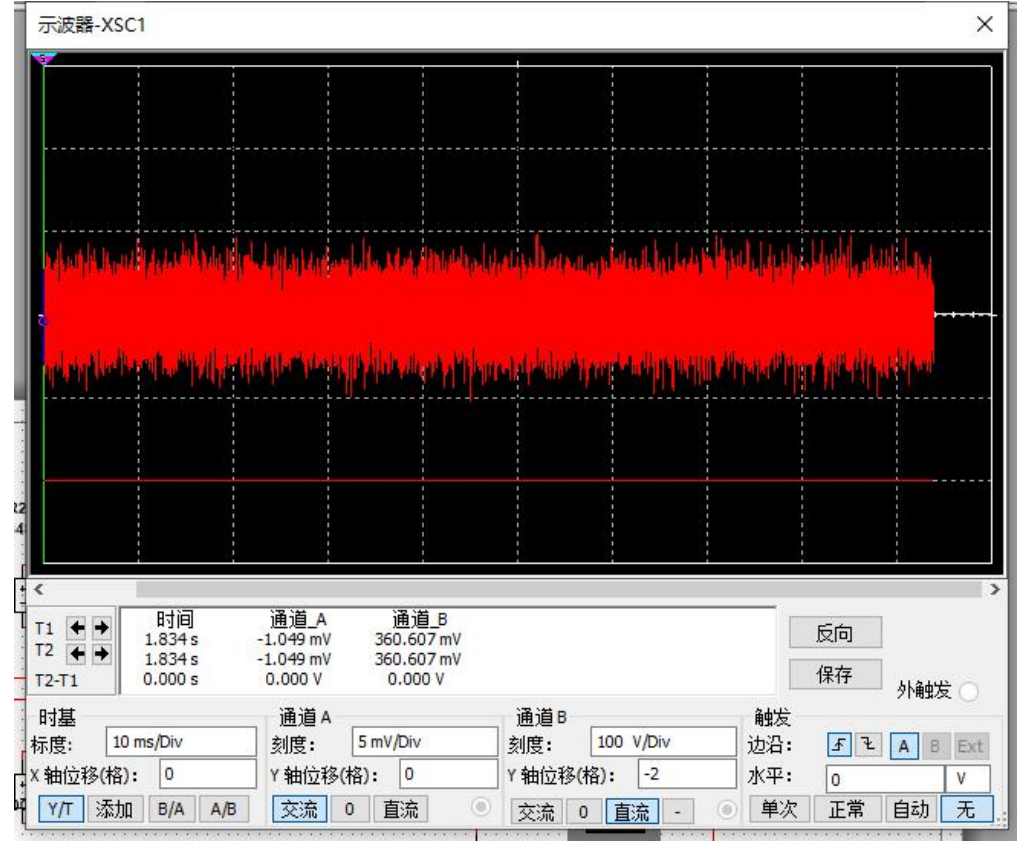
其中：k=Boltzmann's Constant= 1.380649×10^{-23} J/K，温度 T 单位为开尔文

【具体实现】



对放大器输出引入热噪声,可令 C 为 1uF, R 为 10kΩ, 因此该滤波器截止频率为 1000HZ, 可以将大于 1000HZ 的噪音过滤。经过检验, 发现此滤波器的滤波效果很好。

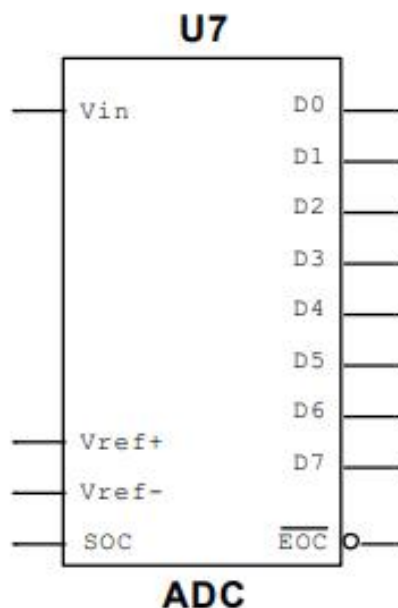
滤波效果：直线为滤波后的电压曲线，下面为噪声



➤ 4、模/数转换 ADC 的实现（从具体实现展开介绍）

【具体实现】

8 位 ADC



V_{in} 为输入引脚，接转换的模拟量。

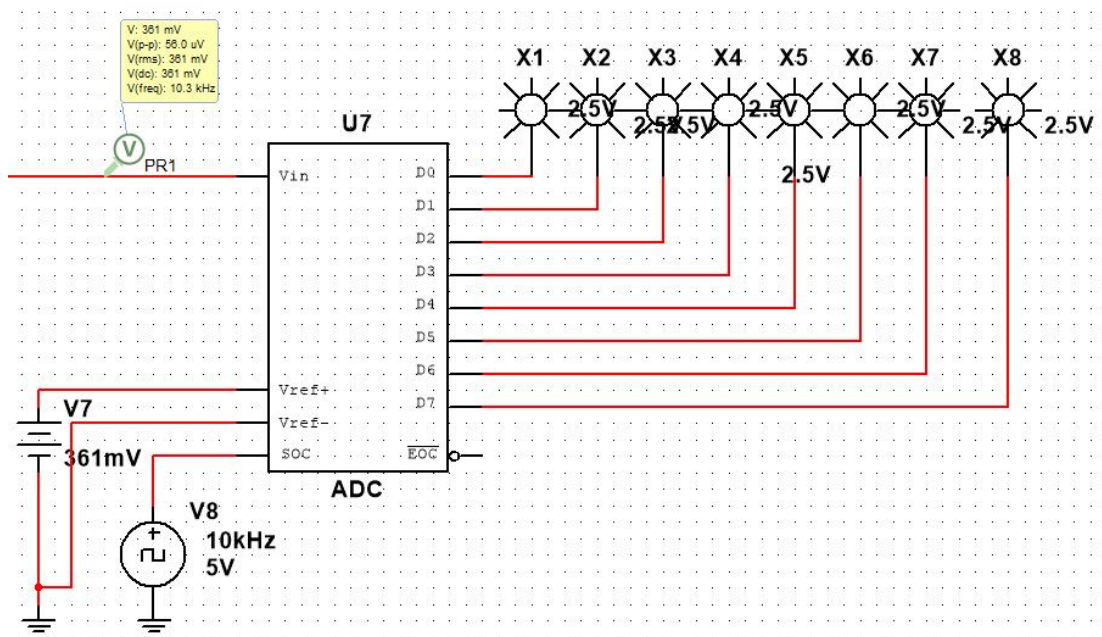
V_{ref+} 和 V_{ref-} 引脚之间电压成立满量程电压。满量程电压由下式给出：

$V_{ref} = V_{ref+} - V_{ref-}$ 。

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。



将电压通过 V_{in} 接入到 ADC 中，从而可以通过输出引脚的模拟量反应输入的电压情况。

结论：

放大效果与阻值大小无关，与运放的开环增益 A 无关，但是与 R1 和 R2 的比值有关。放大倍数 $=-R_2/R_1$ 。

➤ 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	T	B	R（R 的个数滤波器决定）	C	
0.361V	1	10k Ω	27 $^{\circ}$ C	1M	1k Ω	1 μ F	361mV
	1	10k Ω	27 $^{\circ}$ C	1M	1k Ω	10nF	361mV
	10	100k Ω	27 $^{\circ}$ C	1M	1k Ω	1 μ F	361mV
	1	10k Ω	27 $^{\circ}$ C	1M	10k Ω	1 μ F	361mV

结论：

滤波器可以过滤噪声，使得输出电压保持一个相对稳定的状态。可以通过增加滤波器的 R 或者 C，从而减小截止频率 $1/RC$ ，因此可以从更好的提高滤波器的降噪效果。

➤ 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
361mV	361mV	10kHz 5V	1	1	1	1	1	1	1	1
241mV			1	0	1	0	1	0	1	0
180mV			0	1	1	1	1	1	1	1
90mV			0	0	1	1	1	1	1	1

结论：

模数转换器的 8 个接口输出的高低电平排列代表着从 0-255 共 256 个数，D0 到 D7 对应一个二进制值，其值正好为 $V_{in}/(V_{ref+} - V_{ref-}) \times 255$ 所得十进制的二进制数。其功能是将模拟数字信号转化为数字信号。不同的输入电压会影响最后的转换结果，电压越高，转换出来的 8 位二进制数字越大。因此可以通过 D0 至 D7 的输出判断输入电压为多大，进而获得压控电阻的电压为多少，即重物的质量。

五、思考题

1、电桥电压的大小范围吗？为什么？

有。

因为电桥的输出和电桥电压成正比，电桥的电压不宜过小。如果电桥的电压过小，会导致电桥输出的电压很小，模拟电子秤的灵敏度不高，导致称量的误差大。

电桥的电压也不宜过大，过大会产生较大的功率消耗，不能满足实际应用的需求。满量程时电桥输出电压过大，超过运放的放大范围，这时候运放输出的电压就不准确。

电压为几伏的时候最好。

2、模数转换器 ADC 是如何实现的？

AD 转换是将时间连续和幅值连续的模拟量转换为时间离散、幅值也离散的数

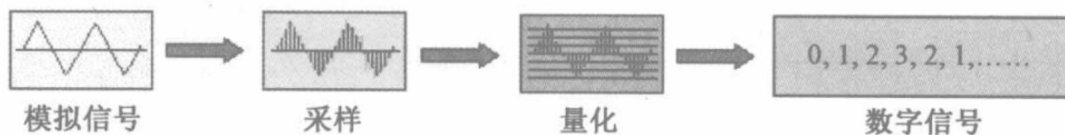
字量。使输出的数字量与输入的模拟量成正比。

采样：将连续时间信号变成离散时间信号的过程。

量化：将连续数值信号变成离散数值信号的过程。

编码：将数字信号的数值转换成二进制代码。

保持：量化和编码总是需要一定时间才能完成，所以，量化电路的前面还要有一个保持电路。



采样&保持-概述

对模拟信号进行 A/D 转换时，需要一定的转换时间，在这个转换时间内，模拟信号要保持基本不变，这样才能保证转换精度。采样保持电路即为实现这种功能的电路。

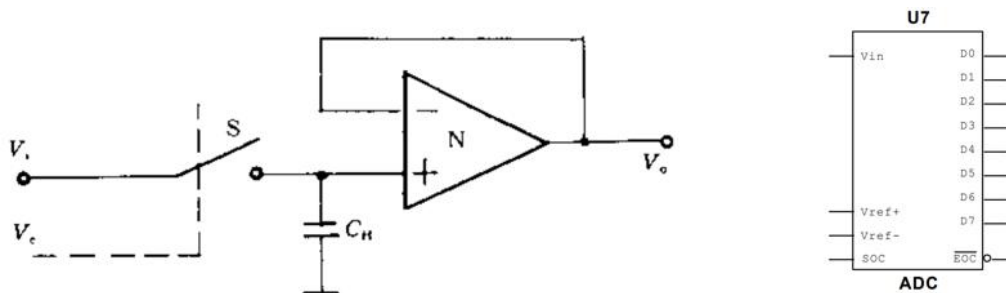
在输入逻辑电平控制下处于“采样”或“保持”两种工作状态。“采样”状态下电路的输出跟踪输入模拟信号，在“保持”状态下电路的输出保持前次采样结束时刻的瞬时输入模拟信号，直至进入下一次采样状态为止。

最基本的采样保持器由模拟开关（MOS 管）、存储元件（保持电容）和放大器组成。

当 V_c 为采样电平时，开关 s 导通，模拟信号 V_i 通过 S 向 CH 充电，输出电压 V_o 跟踪模拟信号的变化；

当 V_c 为保持电平时，开关 S 断开，输出电压 V_o 保持在模拟开关断开瞬间的输入信号值。

高输入阻抗的缓冲放大器的作用是把 CH 和负载隔离，否则保持阶段在 CH 上的电荷会通过负载放掉，无法实现保持功能。



采样&保持-概述-缺点&改进

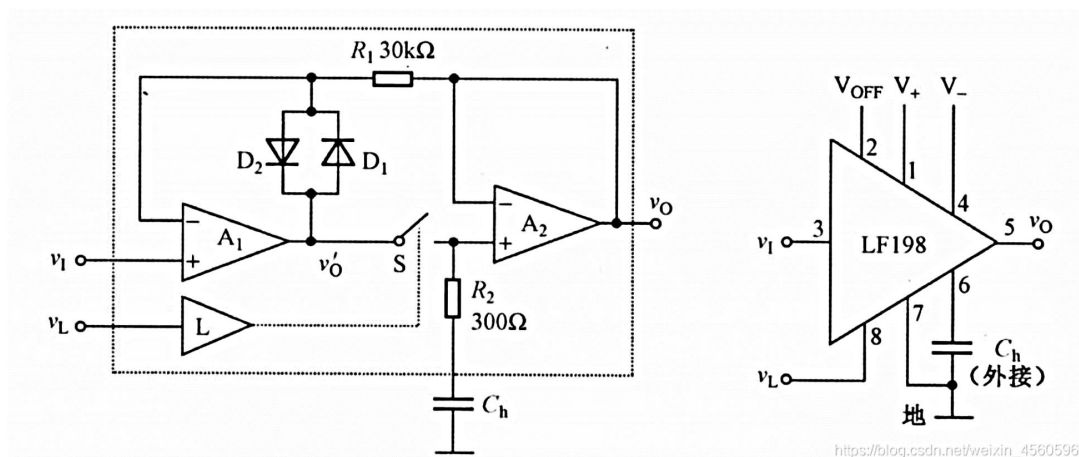
采样过程中需要向 Ch 充电，使得采样速率受到了限制

改进：

V_L 引脚控制着开关的闭合，当为高电平时开关打开。模拟电压可经过两级跟随器传至 V_o

当 V_L 由高变低时，还有电容 Ch 放电提供相应电压，电平得以维持。

当输入的电压比较大，超出了开关所能承受的最大电压时，引入一个二极管电路，通过单向导通的性质可以起到分压的作用，且当电压合适时该电路不起分压作用。



采样&保持-SOC&Vin

V_{in} 为输入引脚，接转换的模拟量

SOC 是开始转换的输入，上升沿有效

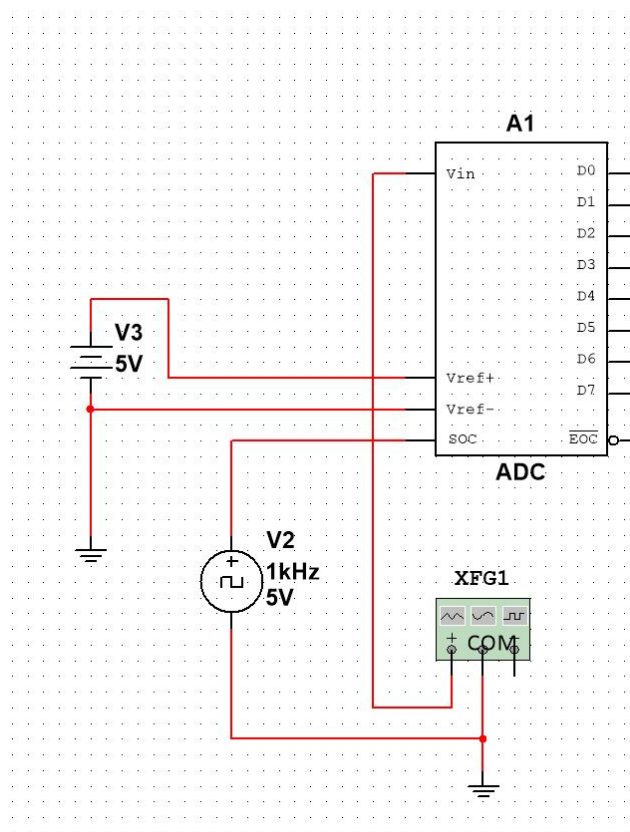
采样定理反映了采样信号频率与输入信号频率之间的制约关系，可理解为采样信号的频谱（低通滤波器）一定要包含输入信号频谱的全部内容。

根据采样定理，为了正确无误的用采样信号表示模拟信号，必须满足：采样频率 $\geq 2 \times$ 输入信号最高频率分量的频率

在满足采样定理的条件下，可以用一个低通滤波器将采样信号还原为模拟信号。

因此：采样定理规定了 A/D 转换的频率下限

采样-保持器的基本结构有：串联型，反馈型，电容校正型



量化&编码-概述

数字信号一定是在数值上离散的。且任何一个数字量都会是一个基础数字量的整数倍。

故选取一个最小的变量作为单位变量。将模拟电压与之相除后就能得出相应的数字二进制代码，经推算也可以得出对应的模拟电平。

上图的单位变量就为 $1/8V$ ，量化误差（每两个单位间隔中可能出现的最大误差）也是 $1/8$ 。

模拟电平	二进制代码	代表的模拟电平	模拟电平	二进制代码	代表的模拟电平
1V	111	$7\Delta=(7/8)V$	1V	111	$7\Delta=(14/15)V$
7/8	110	$6\Delta=6/8$	13/15	110	$6\Delta=12/15$
6/8	101	$5\Delta=5/8$	11/15	101	$5\Delta=10/15$
5/8	100	$4\Delta=4/8$	9/15	100	$4\Delta=8/15$
4/8	011	$3\Delta=3/8$	7/15	011	$3\Delta=6/15$
3/8	010	$2\Delta=2/8$	5/15	010	$2\Delta=4/15$
2/8	001	$1\Delta=1/8$	3/15	001	$1\Delta=2/15$
1/8	000	$0\Delta=0$	1/15	000	$0\Delta=0$
0			0		

https://blog.csdn.net/weixin_45605967

量化&编码-逐次比较型 ADC

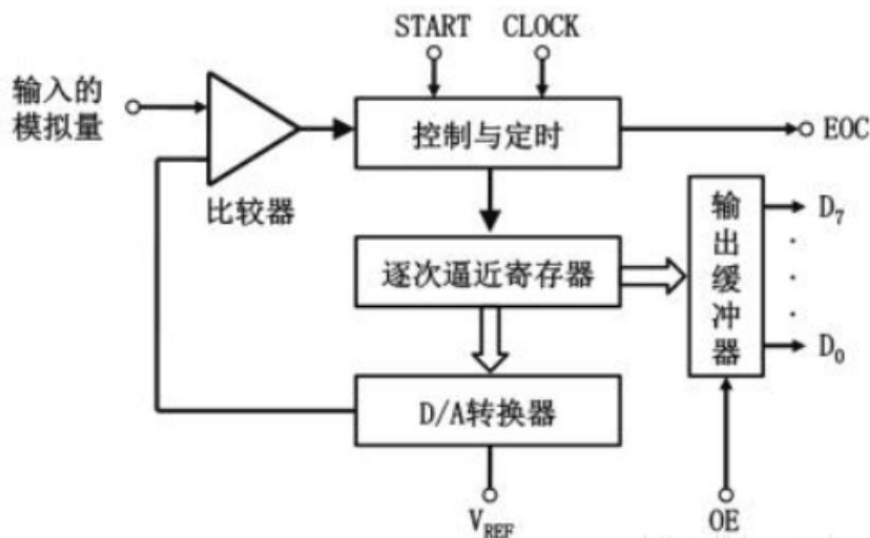
从高位到低位逐位试探比较，好像用天平称物体，从重到轻逐级增减砝码进行试探。

逐次逼近法转换过程是：初始化时将逐次逼近寄存器各位清零；转换开始时，先将逐次逼近寄存器最高位置 1，送入 D/A 转换器，经 D/A 转换后生成的模拟量送入比较器，称为 V_o ，与送入比较器的待转换的模拟量 V_i 进行比较。

若 $V_o < V_i$ ，该位 1 被保留，否则被清除。

再置逐次逼近寄存器次高位为 1，将寄存器中新的数字量送 D/A 转换器，输出的 V_o 再与 V_i 比较。

重复此过程，直至逼近寄存器最低位。转换结束后，将逐次逼近寄存器中的数字量送入缓冲寄存器，得到数字量的输出。



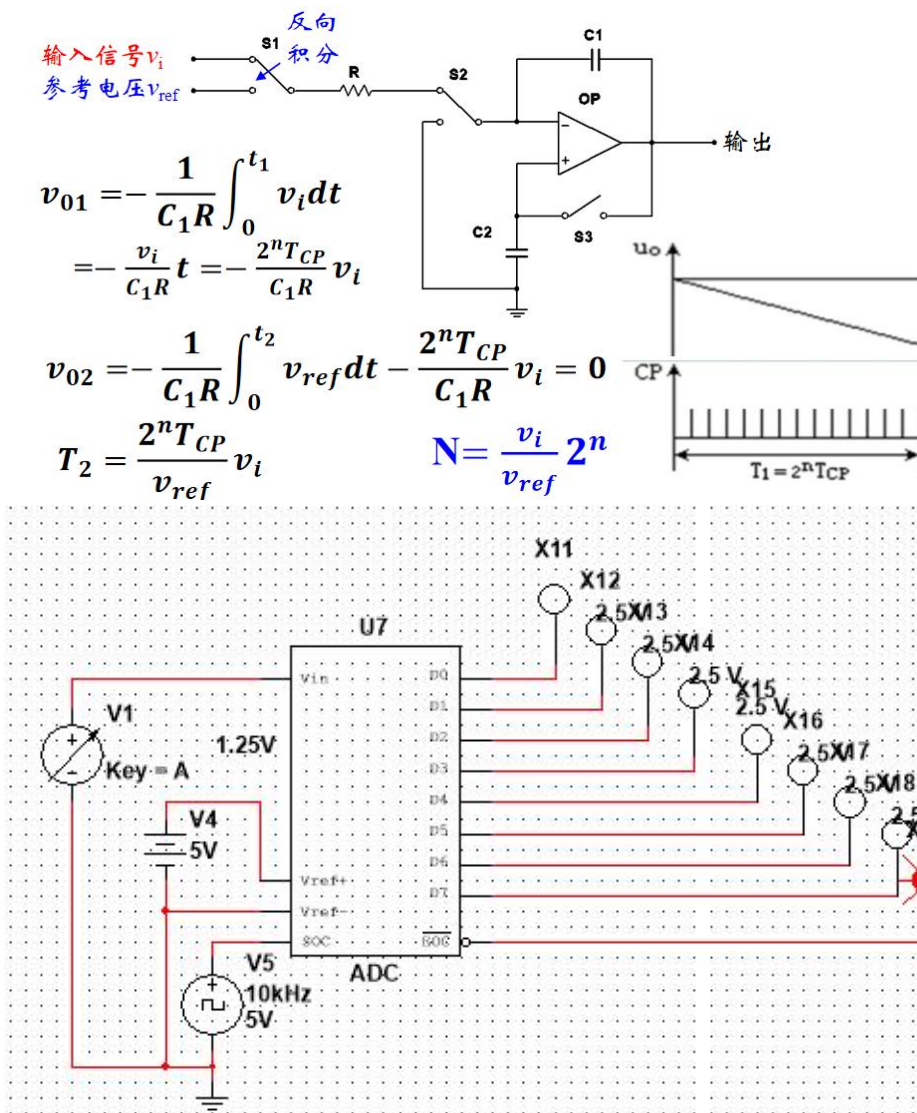
<https://blog.csdn.net/xiti>

量化&编码-积分式 ADC

积分式 A/D 基本工作原理

正向积分（对输入信号积分，获取信号大小）

反向积分（对参考电压积分，将输入信号转换为数字）



$$(D_7 D_6 D_5 D_4 D_3 D_2 D_1 D_0)_{2 \rightarrow 10} = \frac{v_1}{v_{ref}} 2^8$$

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？

最终输入 ADC 的电压与电控电阻的控制电压成正比。

当模数转换器的量程即 $V_{ref+} - V_{ref-}$ 等于输入模数转换器电压 V_{in} 的最大值时，压控电阻与其最大量程的比值和 ADC 输出对应的二进制数与 ADC 最大输出对应的二进制数的比值是相同的。

由于随着控制电压升高，电桥输出电压升高，于是 ADC 的输入电压也升高，

由于 ADC 是将模拟量转换为数字量，当电压升高，转换为二进制的数字也变大。而滤波器产生的增益为 1，故最终输出 ADC 的电压与电控电阻的控制电压成正比。

六、实验总结、必得体会及建议

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。

- **需要掌握的理论：**

- ✧ 用压控电阻模拟导体后电阻变化的原理；
- ✧ 压控电阻个数与灵敏度的关系；
- ✧ 电压跟随器实现隔离的原理；
- ✧ 差动放大器的原理；
- ✧ 热噪声的设置；
- ✧ 反相低通滤波器对高频噪音进行过滤的原理；
- ✧ 模数转换器 ADC 对输入电压转化为灯光信号。

- **遇到的困难：**对 ADC 的运用不熟练，不清楚模数转化器 ADC 电压的设置；如果不加滤波器，如何通过 ADC 测量当前的电压。

- **解决的办法：**通过上网搜寻资料和询问老师同学后便解决了问题。

- **经验教训：**

- ✧ 应选取合适的运算放大电路，最好是预先计算好应放大的倍数，以便选取；
- ✧ 先构思好整个电路，不然可能会导致电路连得特别的乱；
- ✧ 清楚示波器接入的位置，热噪声后和滤波器后应该各接入一个通道，以便后续观察电压波形的变化，检验噪声过滤效果。
- ✧ 要熟练的通过观察示波器来计算各种数值。

2、对本实验内容、过程和方法的改进建议（可选项）。