

第一次电路实践：神经元电路实验报告

傅世平 2021K8009926014

一：电路设计图

神经元电路的设计原理图如图 1 所示：

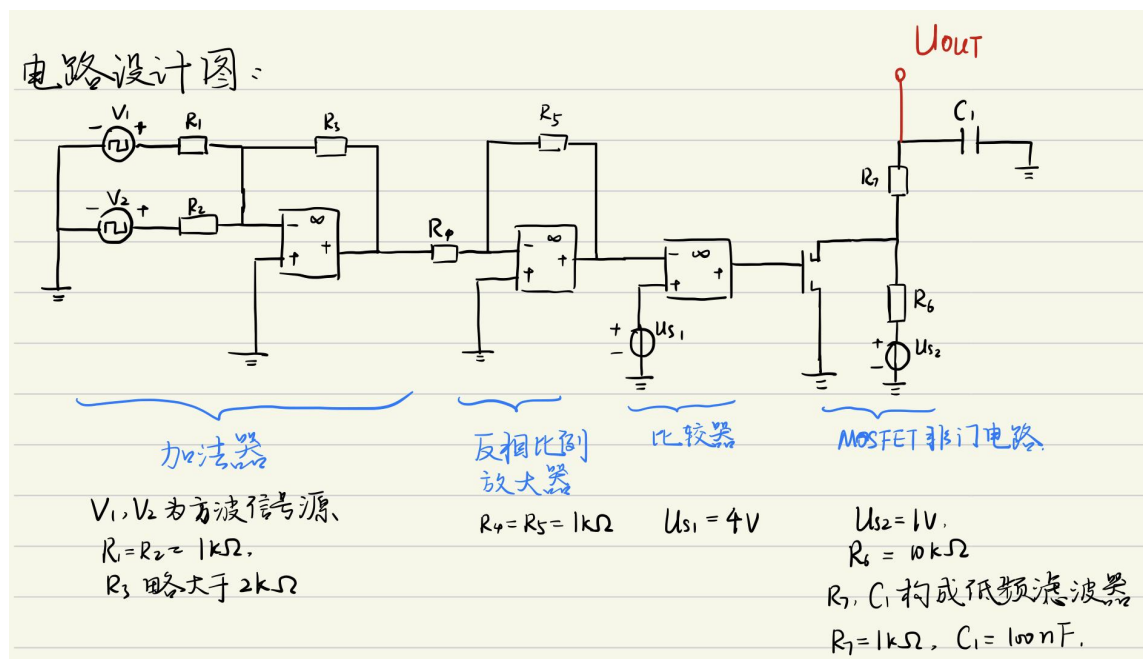


图 1 电路设计图

二：电路设计思路

神经元电路的设计可分为以下三部分：输入初步处理，输入与阈值比较，输出标准电压。

（一）输入初步处理：

此电路通过两个方波信号源作为输入。为实现两个输入的线性加法，此处使用运算放大器构成加法器（此处 R_1 、 R_2 、 R_3 分别设为 $1k\Omega$ 、 $1k\Omega$ 和略大于 $2k\Omega$ ，从而使第一次的输出信号 U_o 略大于输入信号和的两倍： $2(U_1 + U_2)$ ），产生两个输入线性相加的输出信号，但输出的信号与输入符号相反。因此运用反向比例放大器，将原信号 1:1 反向放大，最终得到我们需要的经过初步处理的输入信号。这一部分的设计较为简单。

（二）输入与阈值比较：

设计实验之初，我先考虑使用 MOSFET 来判断输入电压与阈值的关系。由于 MOSFET 可根据 G 端电压的不同，从断路状态变为电阻工作区，可以在 D 端输出不同的电压。初次设计的原理如图 2 所示：

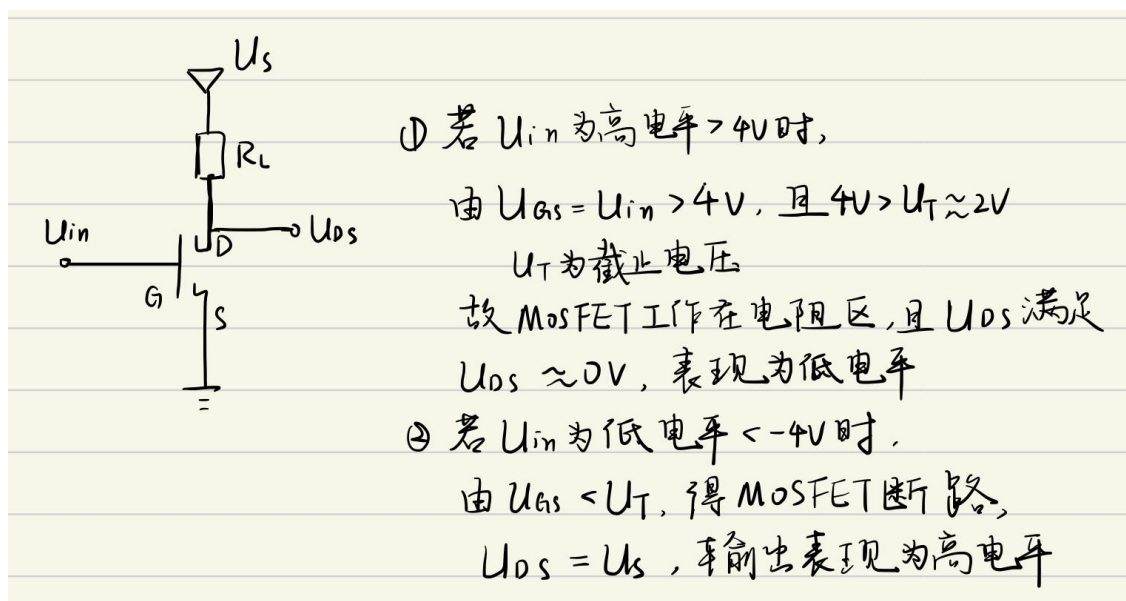


图 2 失败的设计

通过这样的设计，当 U_{in} 大于 $4V$ 阈值时，MOSFET 将输出变为低电平； U_{in} 小于 $4V$ 阈值时，MOSFET 将输出变为高电平。之后再使用 MOSFET 构成一个非门电路即可得到结果。

但是此设计思路存在一个明显的问题：MOSFET 的触发导通电压 U_T 大约为 $2V$ ，这个值与阈值 $4V$ 的差距非常大。假如输入电压 U_{in} 小于阈值 $4V$ 但大于触发导通电压 $2V$ 时，MOSFET 仍能工作在电阻区并输出低电平，在 $2 \sim 4V$ 这个输入电压范围内无法满足实验的要求。因此这样的设计是不合理的。

为了避免这个问题，我在原来的基础上修改，使用运算放大器构建比较器电路（如图 3 所示）：

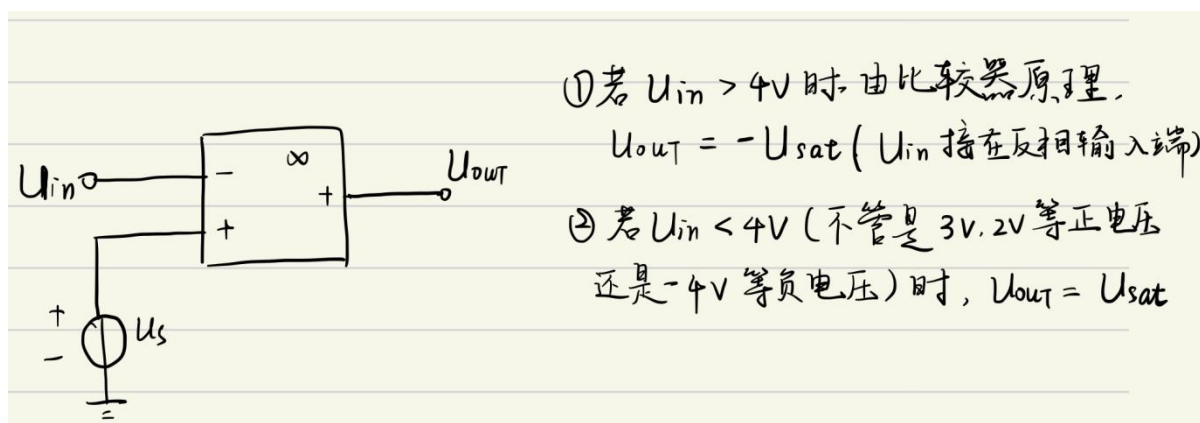


图 3 可行的设计

通过此设计，当 U_{in} 大于 $4V$ 阈值时，比较器将输出负电压 $-U_{sat}$ ； U_{in} 小于 $4V$ 阈值时，比较器将输出正电压 U_{sat} 。这样就实现了输入电压与阈值的比较，同时将比较结果作为一个电压输出。相比于上面失败的设计，比较器电路能够全面地考虑到任意大小的输入电压，并将其与阈值对比。

（三）输出标准电压：

由于第二步设计已经将输入电压与阈值作比较，并把比较的结果转化为一个电压信号（这个电压信号是一个振幅约等于比较器 U_{sat} ，频率与输入信号相同的

方波信号，但同一时刻电压的符合与输入相反）。因此在此处使用 MOSFET 作为“非门”电路，就可以将前面生成的方波信号转化为我们需要的模拟神经元信号，原理如图 4 所示：

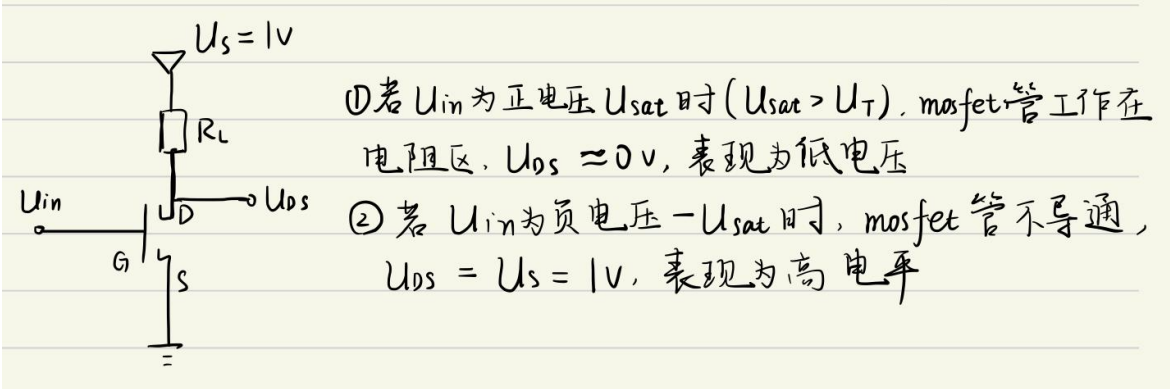


图 4 初步设计

根据初步的设计，我将这一设计电路图在 Multisim 上进行了仿真模拟（仿真电路图将在后文中给出）。结果如图 5 所示：

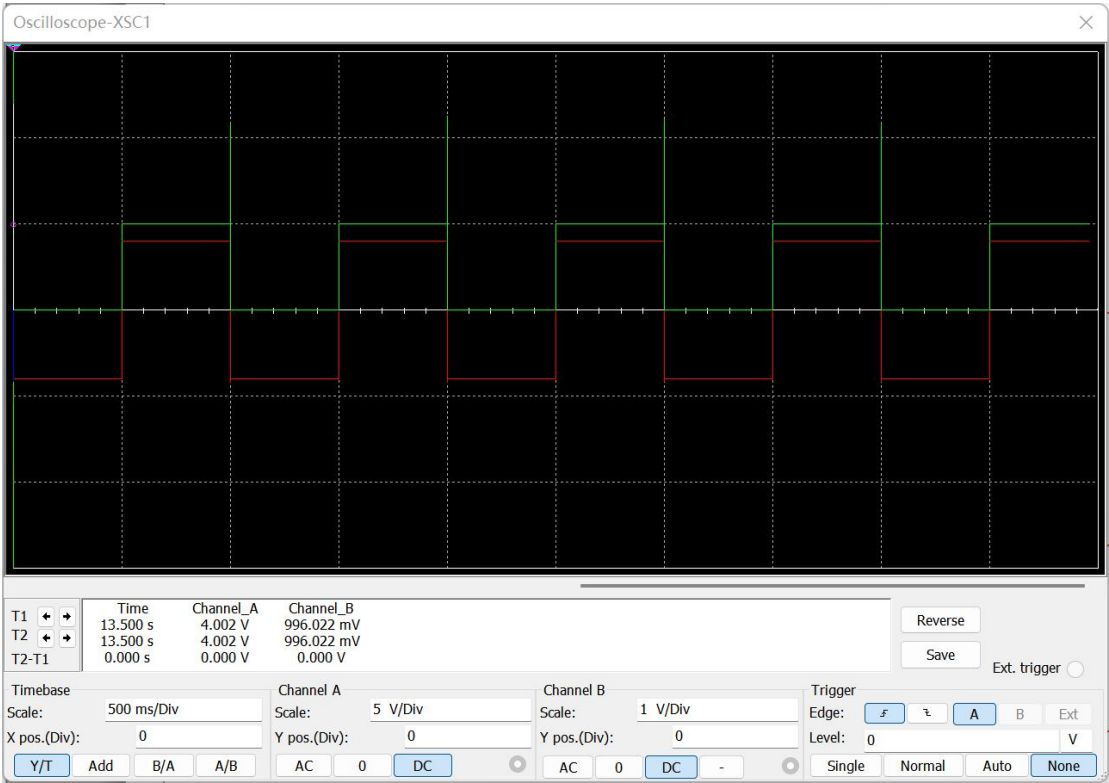


图 5 首次仿真的示波器图样

图中红色波形为经过初步处理的输入电压（即反向比例放大器的输出电压），绿色波形为 MOSFET 的 D 端输出电压（即神经元电路的输出电压）。可看出，当输入电压高于阈值电压时（即 x 轴上方的部分），电路输出电压同为高电平 1V（为 x 轴上方的部分）；当输入电压低于阈值电压时（即 x 轴下方的部分），电路输出电压为低电平 0V（为 x 轴上的部分）。这和我们要求的效果吻合。但同样可以看出，神经元电路输出电压在从高电平跳跃至低电平时有一个很大的冲击。具体图形如图 6 所示：

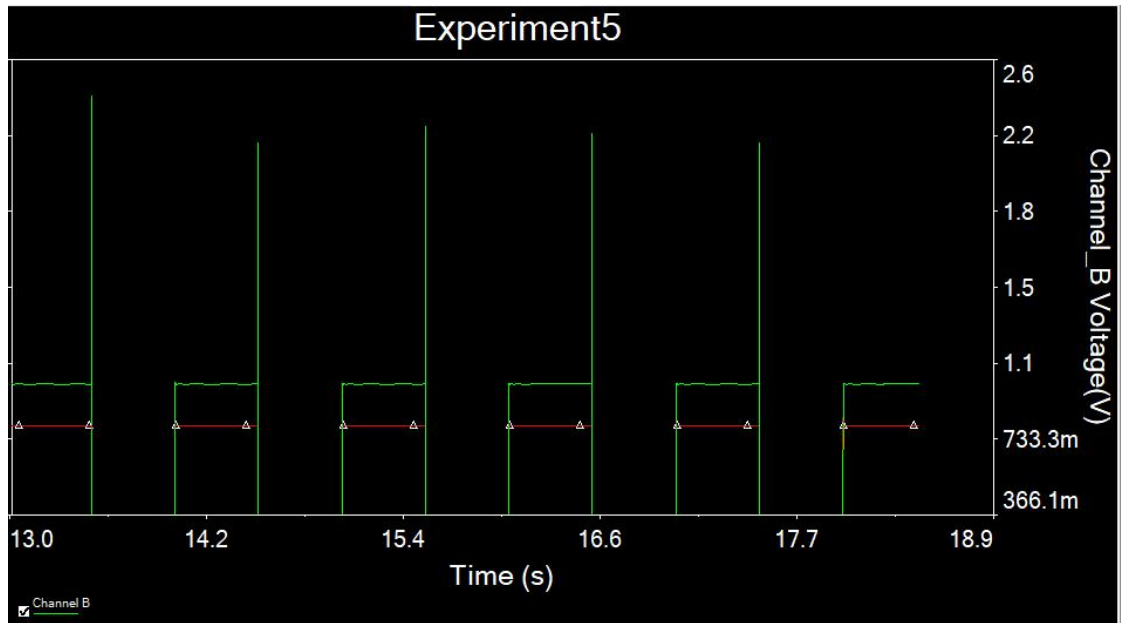


图 6 仿真中的冲击误差

由图可知，输出电压的冲击幅值在 $2.2\text{V} \sim 2.6\text{V}$ 之间，相比于正常输出的高电平 1V ，相对误差达到了 $120\% \sim 160\%$ ，这个结果远远超过了我们对误差的预期。因此需要对电路进行一些改进。

在分析电路出现误差原因的过程中，我尝试检验前面每个运算放大器输出电压的误差情况。在这一过程中，我发现比较器的输出电压在变化时（从正到负）响应的事件远远大于方波信号从正电压变为负电压所用时间（设置为 1ns ），比较器的响应时间如图 7 所示：

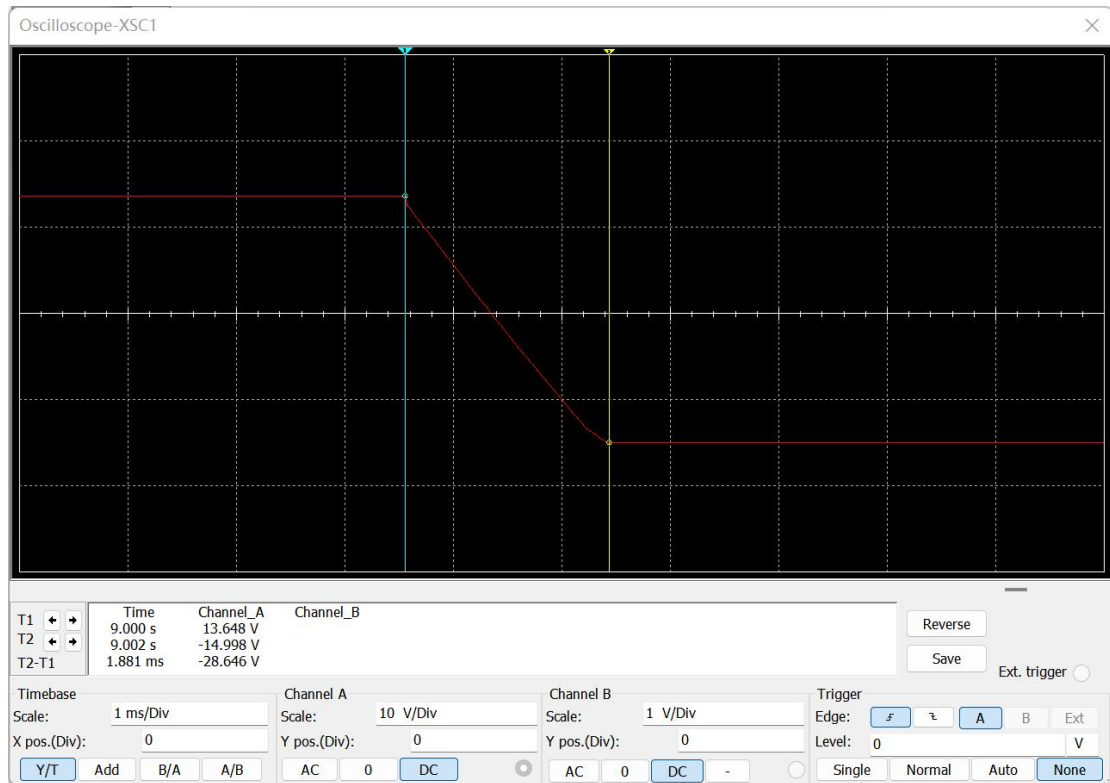


图 7 比较器电压变化的响应时间

如图所示，从正电压变为负电压，比较器的输出经历 1.881ms ，是输入方波

信号源的 1.8×10^6 倍，因此我认为这一延迟是后面发生冲击误差的主要来源。
（这样认为的原因是：由于延迟时间很长，因此在这段时间内，MOSFET 并未从断开状态直接跳转至电阻区，而是经过了电流源区。因此导致这一段的输出电压不再等于 $U_S=1V$ ，而是出现了明显的冲击。）

为了减小这一误差，我尝试使用正反馈的比较器（如图 8 所示），滞回比较器（如图 9 所示）等电路，但都没能有效减小这一冲击误差。

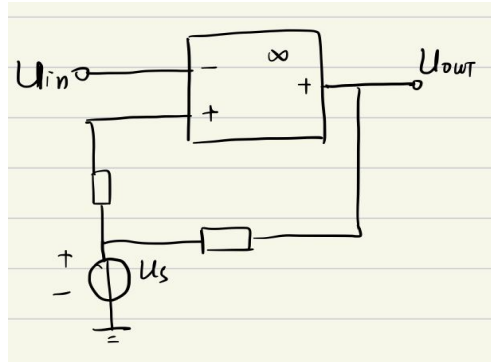


图 8 正反馈的比较器（我认为这个电路连得不太对）

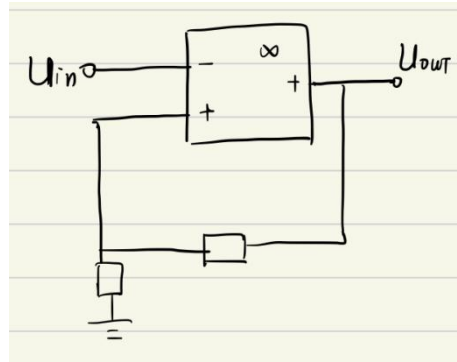


图 9 滞回比较器

由于改造比较器电路没有成功，我决定不再纠结于比较器的时间延迟问题，而是考虑能否直接消去输出电压的冲击效果。因此我在神经元电路输出电压的位置连接了一个低通的滤波器，如图 10 所示：

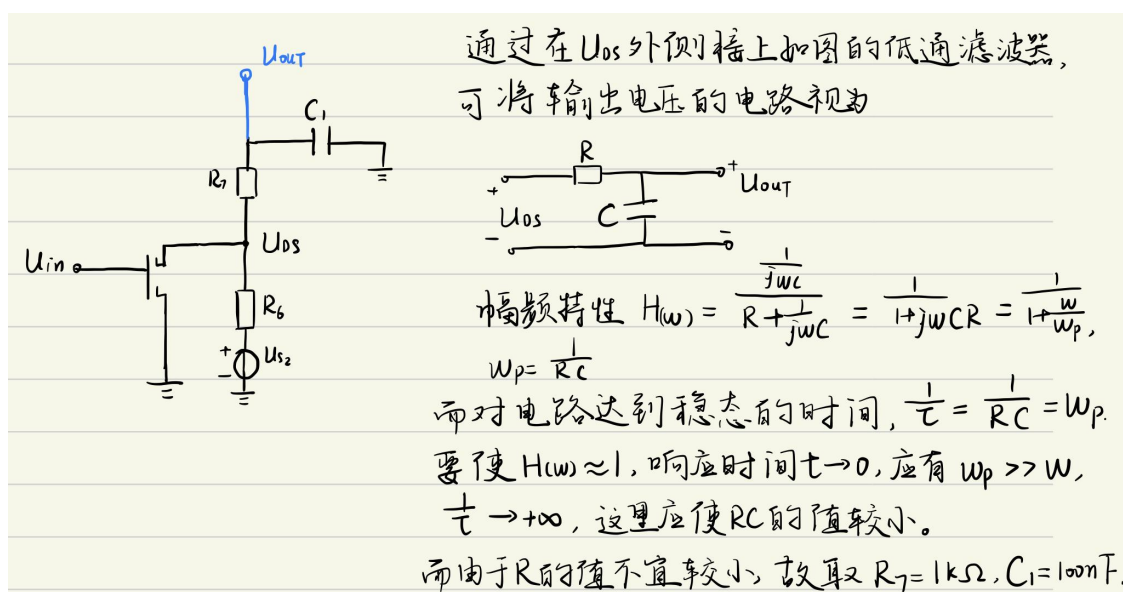


图 10 低通滤波器原理示意

经过这些改动，最终神经元电路变为图 1(电路设计图)的结构，通过 Multisim 仿真模拟神经元电路输出的电压，得到的结果如图 11 所示：

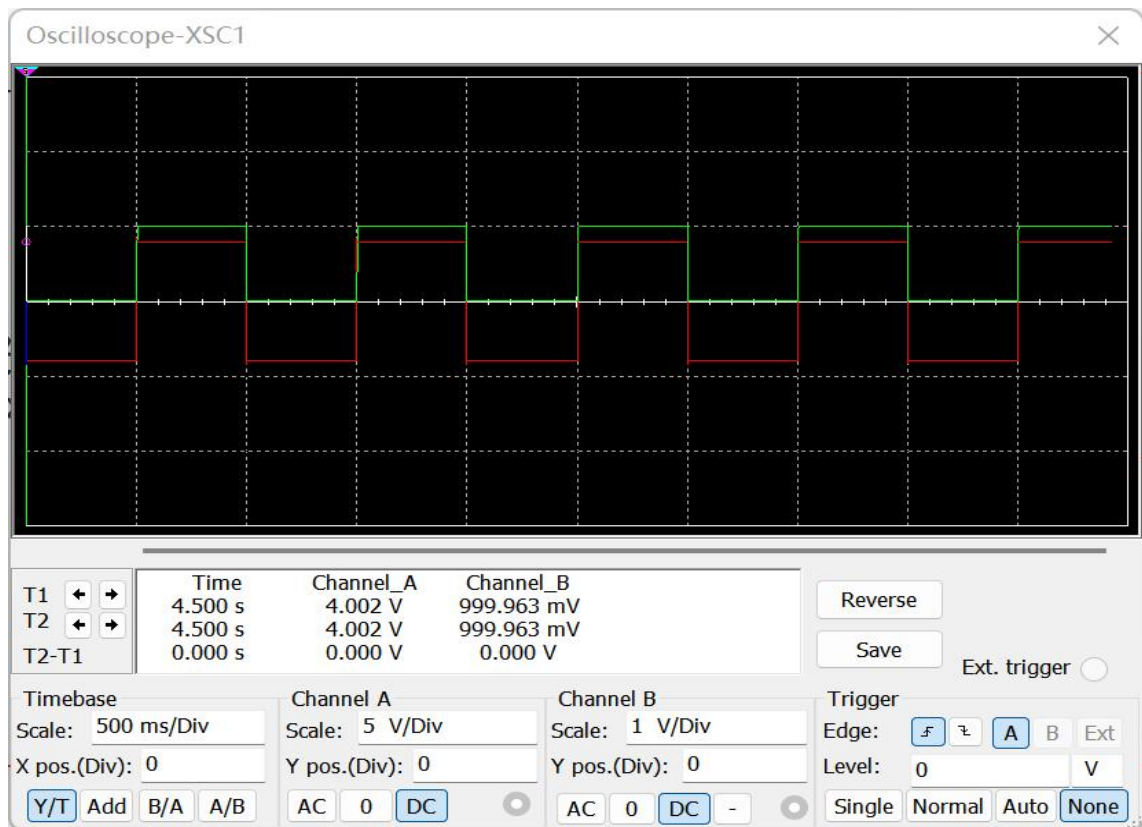


图 11 最终电路输出电压的波形

Channel_A 与 Channel_B 的波形意义与图 6 相同。由图可见，输入与输出电压在时域上的对应关系仍然与我们的期望相同。而对比没有滤波器的情况，加上滤波器电路的输出电压已经没有冲击现象。具体的数值及误差分析将在仿真部分详细讨论。

三：仿真电路

（一）仿真电路图：

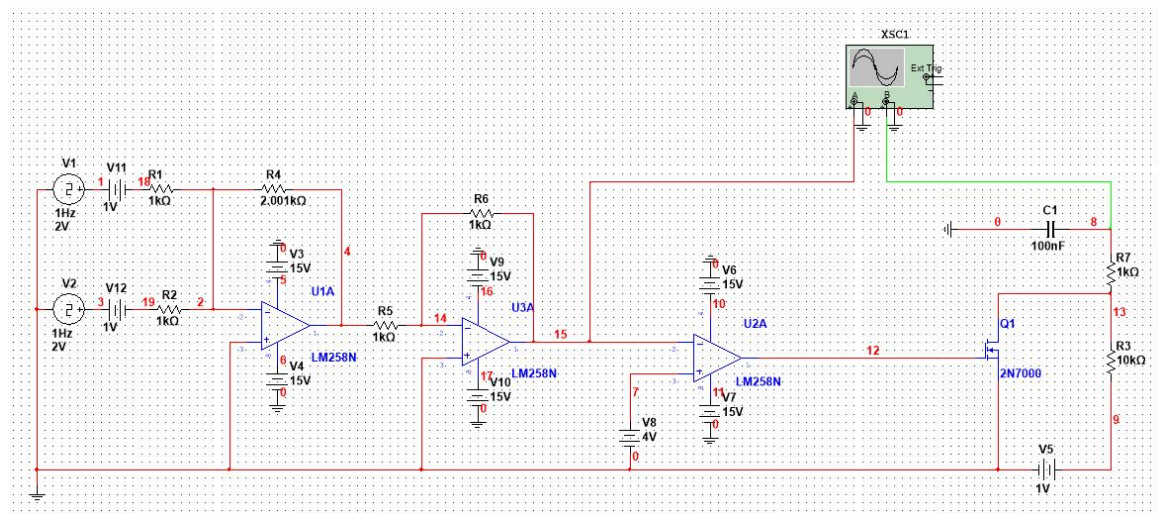


图 12 仿真电路

（注：图中使用的直流电压源，在实际操作中将会通过分压网络得到相应的电压；图中的方波信号源存在 1V 的直流分量，仿真时通过加反向的 1V 直流电压源抵消，从而实现振幅为 1V，平均值为 0 的方波信号源。实际操作中将会通过软件生成这样的信号源。）

（二）仿真数据分析：

1. 输入电压超过阈值的情况：

输入电压初步处理后为 4.002V，大于阈值 4V，因此神经元电路输出高电平为 1V，低电平为 0 的方波信号。如图 13 所示：

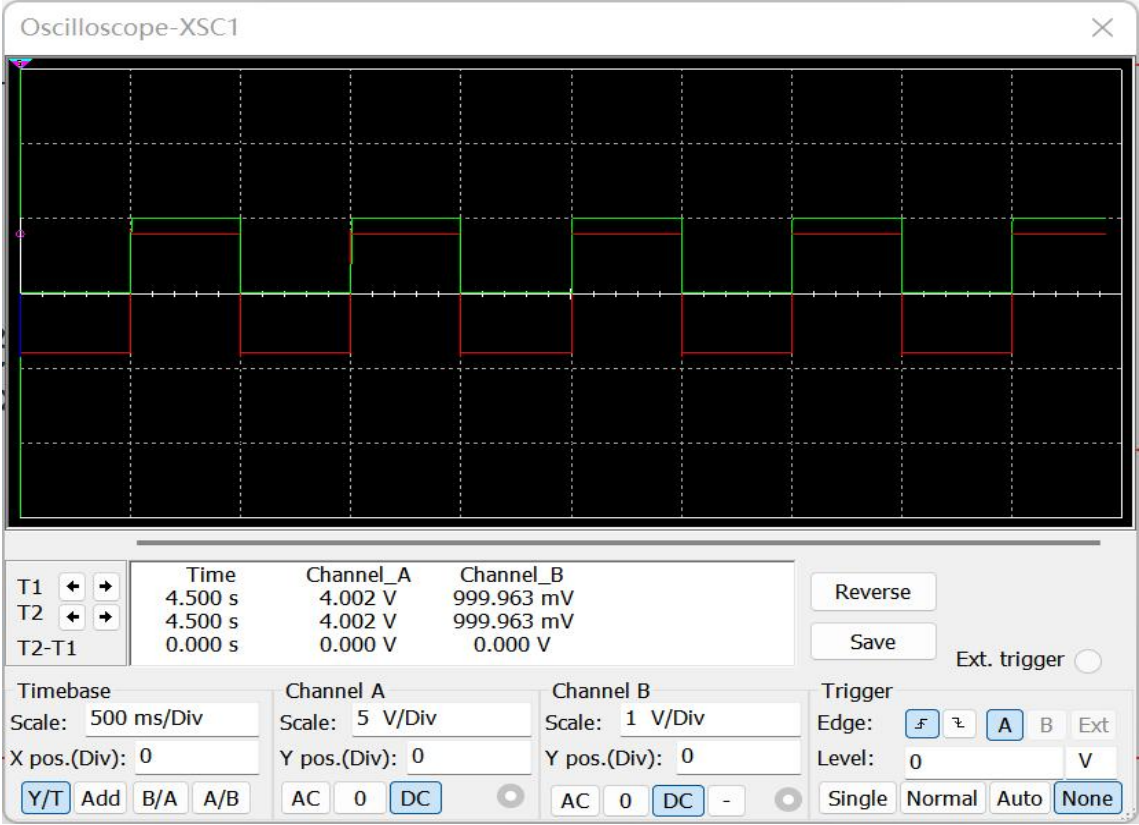


图 13 超过阈值的波形

图 14（见下页）表示出图像放大后的输出电压，通过右侧 Channel_B 的示数可看出，输出电压高电平为 999.982V，相对 1V 的相对误差为 0.0018%，误差极小，说明电路仿真的结果与预期的结果符合的很好；输出电压低电平为 205.7264 μ V，相对 1V 可以忽略不计，说明低电平的仿真结果也符合预期。

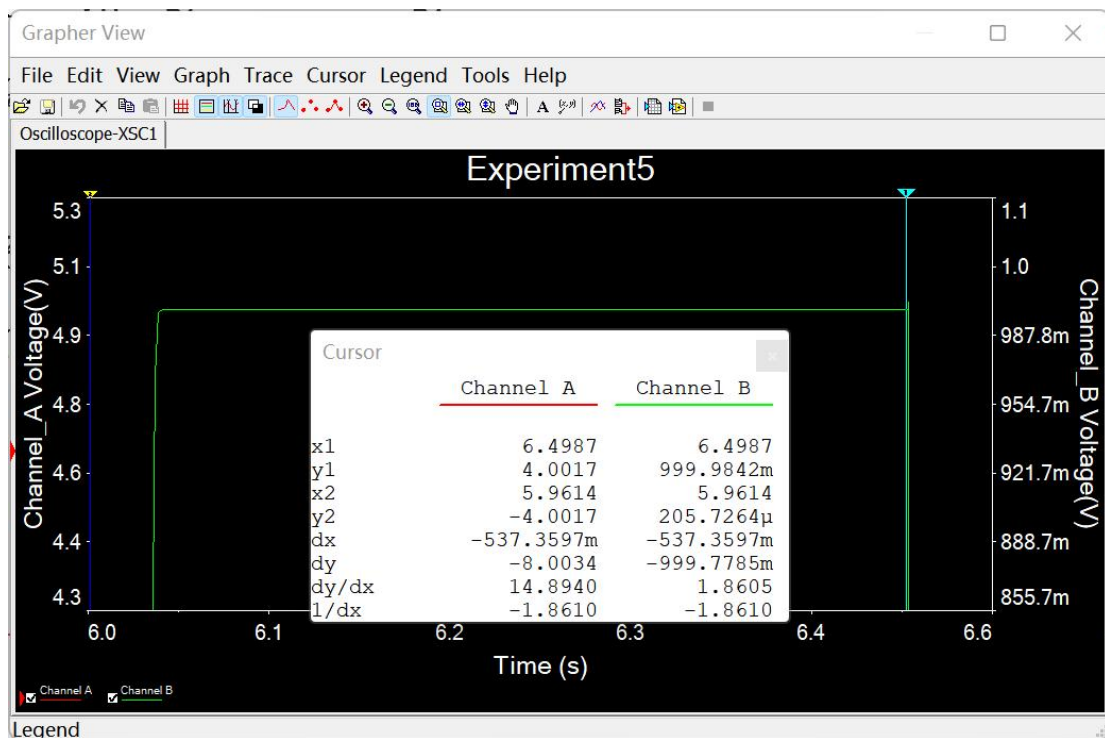


图 14 输出电压的误差分析

2. 输入电压等于阈值的情况:

输入电压初步处理后为 4V, 等于阈值 4V, 因此神经元电路输出信号始终为 0, 如图 15 所示:

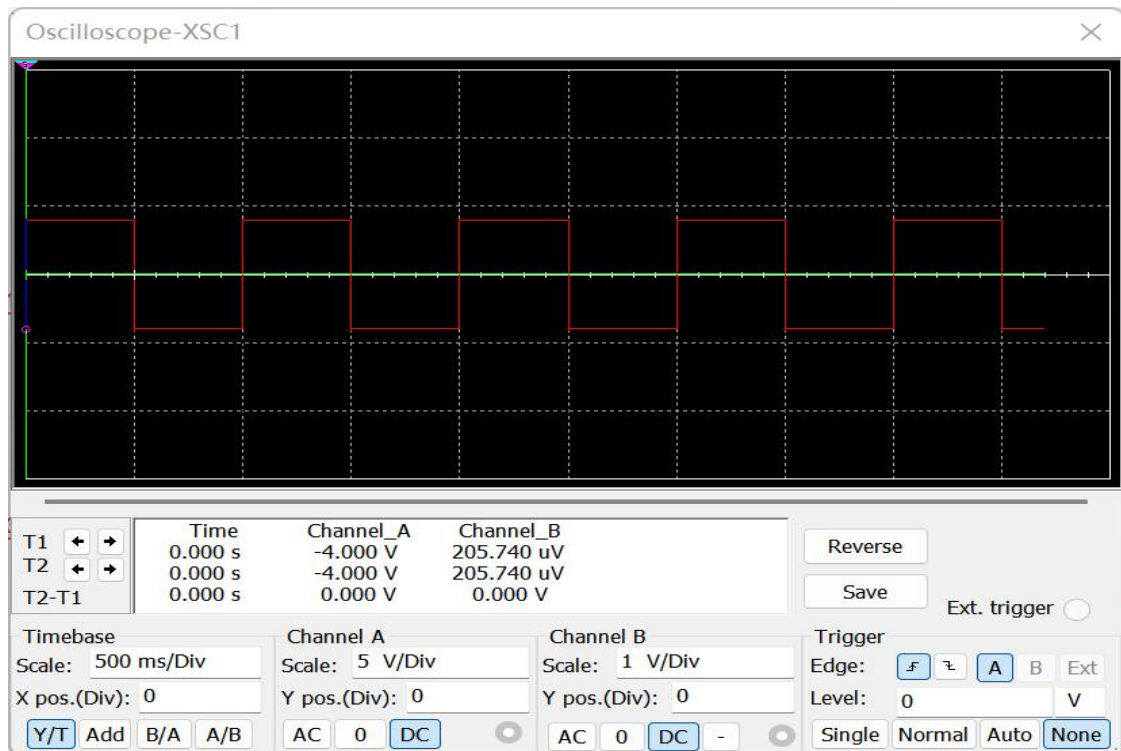


图 15 等于阈值的波形

图 16 表示出图像放大后的输出电压, 通过右侧 Channel1_B 的示数可看出,

输出电压始终为 $205.7404\text{ }\mu\text{V}$ ，相对 1V 可以忽略不计，说明仿真结果是符合预期的。

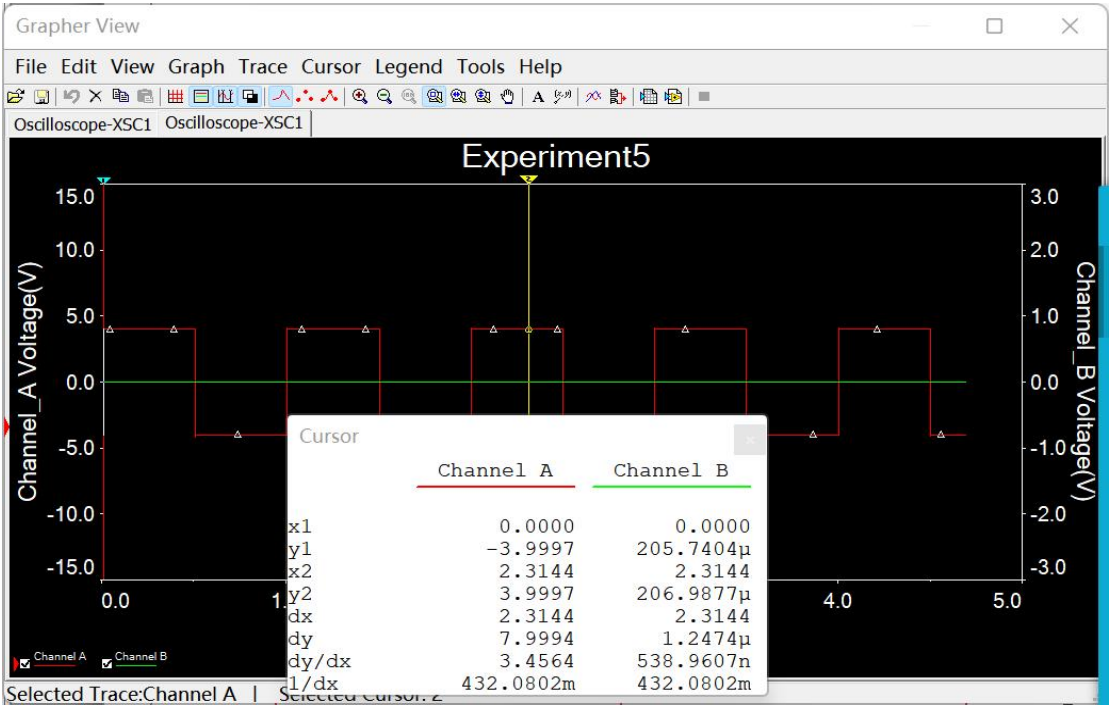


图 16 输出电压的误差分析

3. 输入电压小于阈值的情况：

输入电压初步处理后为 2.5V ，小于阈值 4V ，因此神经元电路输出信号始终为 0 ，如图 17 所示：

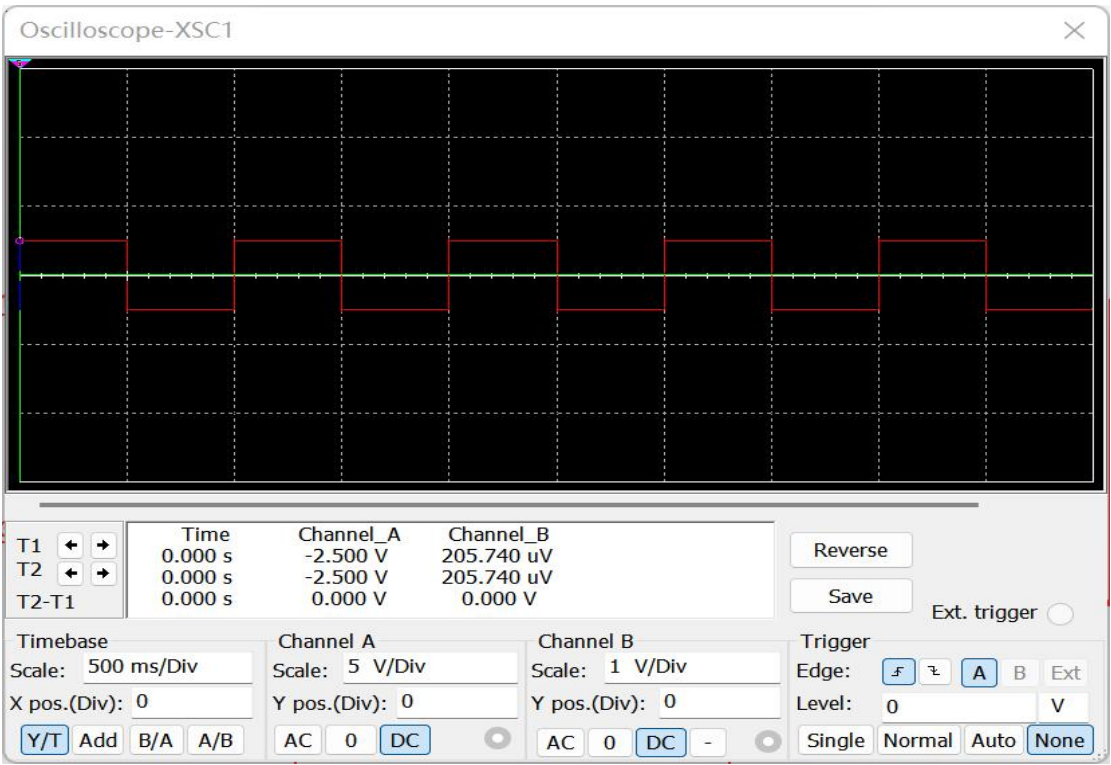


图 17 低于阈值的波形

低于 4V 阈值的情况下，输出电压与上一种情况完全相同，说明仿真与预期符合得很好。

4. 调整占空比的情况：

调整方波信号源的占空比为 30%，通过仿真模拟，可发现随着输入信号占空比的改变，输出电压也发生了响应的变化，如图 18 所示：

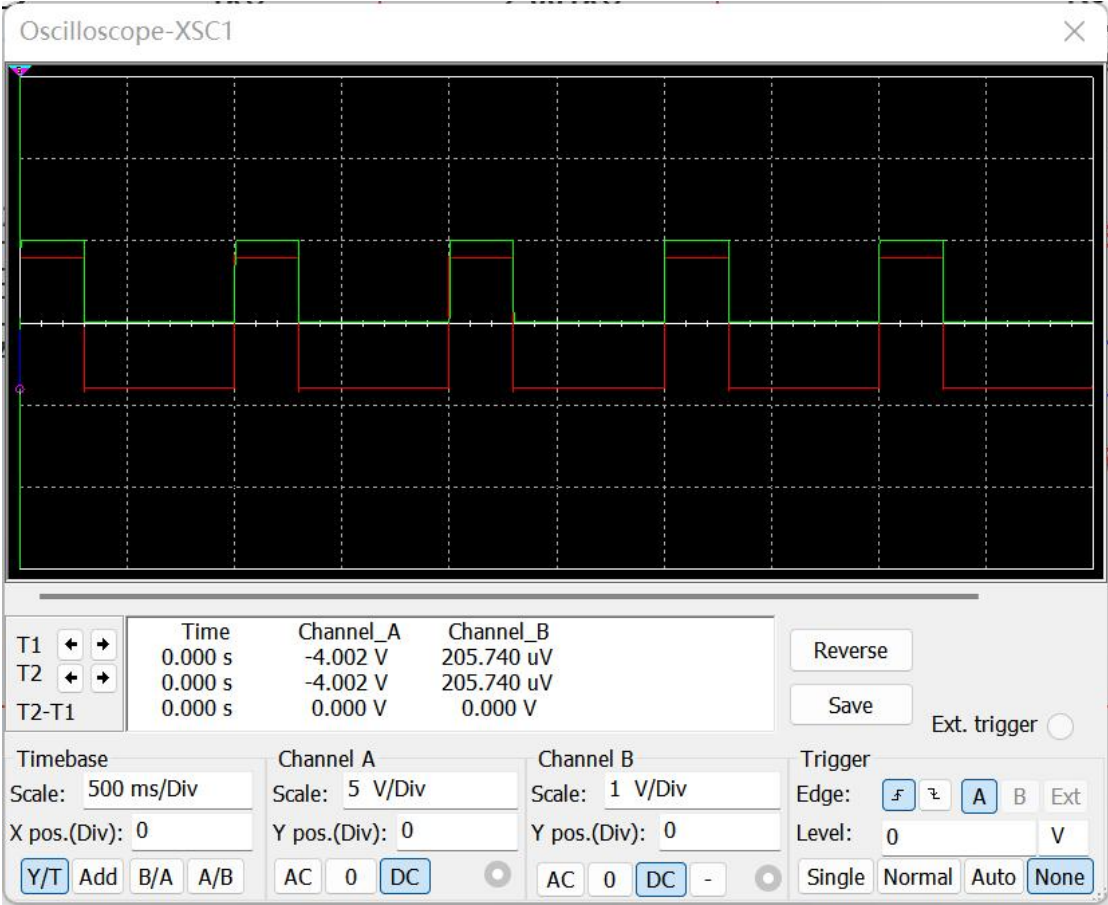


图 18 改变占空比后的输出电压

四：实体电路图

在面包板上搭建的实体电路图如图 19 所示：

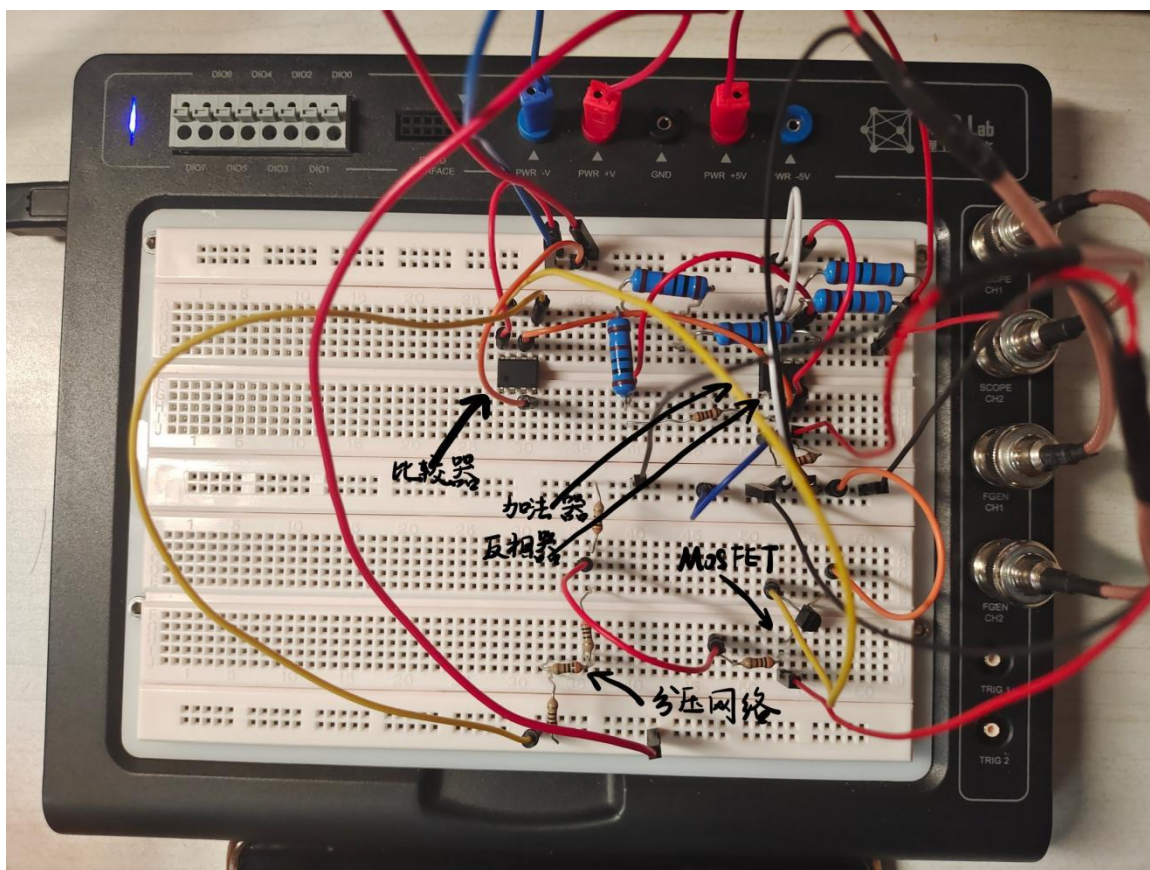


图 19 实体电路图

其中使用的运算放大器为 LM258N，MOSFET 为 2N7000

五：实际验证效果

（一）正常的输出效果：

通过调配加法器，使得经过初步处理的输入值为 6V（如黄色波形所示），得到神经元电路输出值高电平为 981.8mV，相对 1V 误差为 1.82%，在可接受的范围内；低电平为 2.67mV，相对 1V 较小，可忽略。具体图像如图 20、21 所示（见下页）：

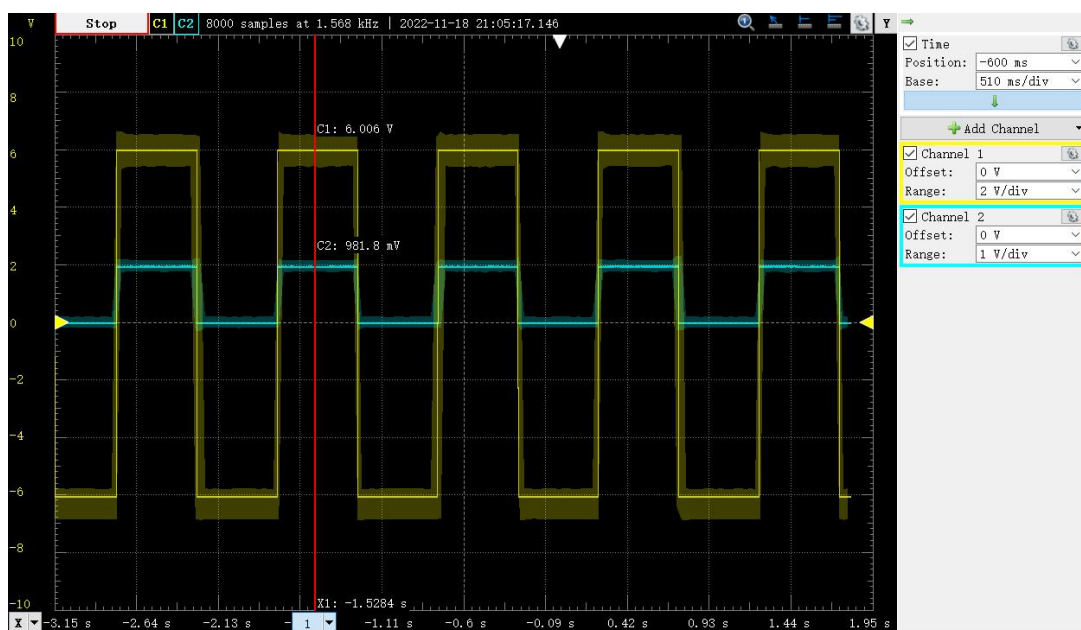


图 20 正常输出图像 (1)

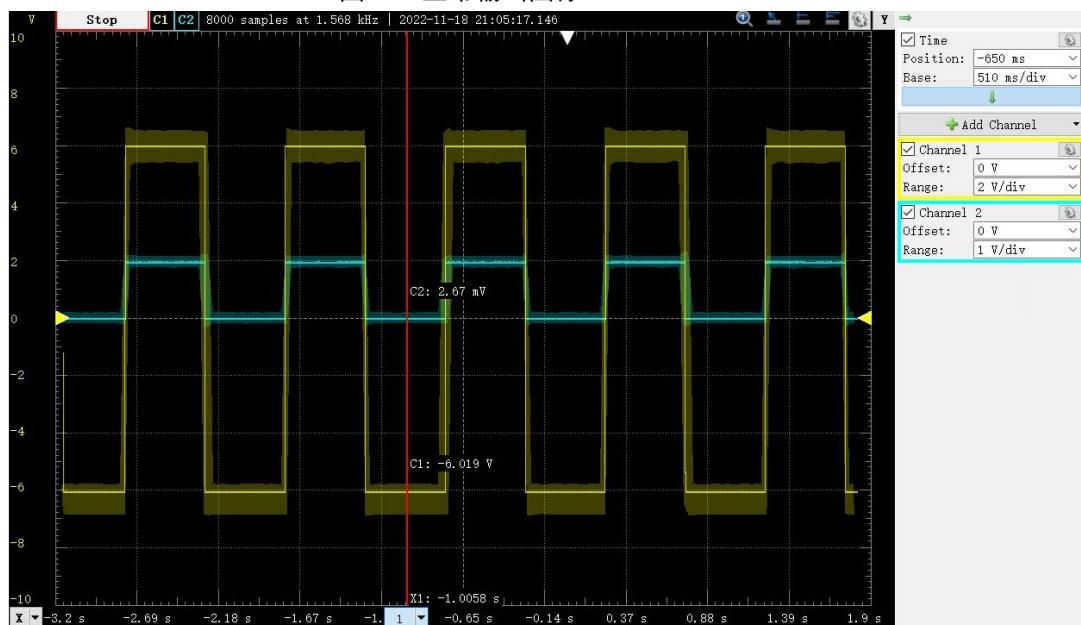


图 21 正常输出图像 (2)

(二) 调整占空比的输出效果:

调整方波使占空比为 30%，可发现神经元电路输出电压也随之改变，且高电平值为 981.8mV、，相对 1V 误差仍为 1.82%，在可接受的范围内。输出电压波形的改变，说明了电路的设计是完整的。具体图像如图 22 所示（见下页）:

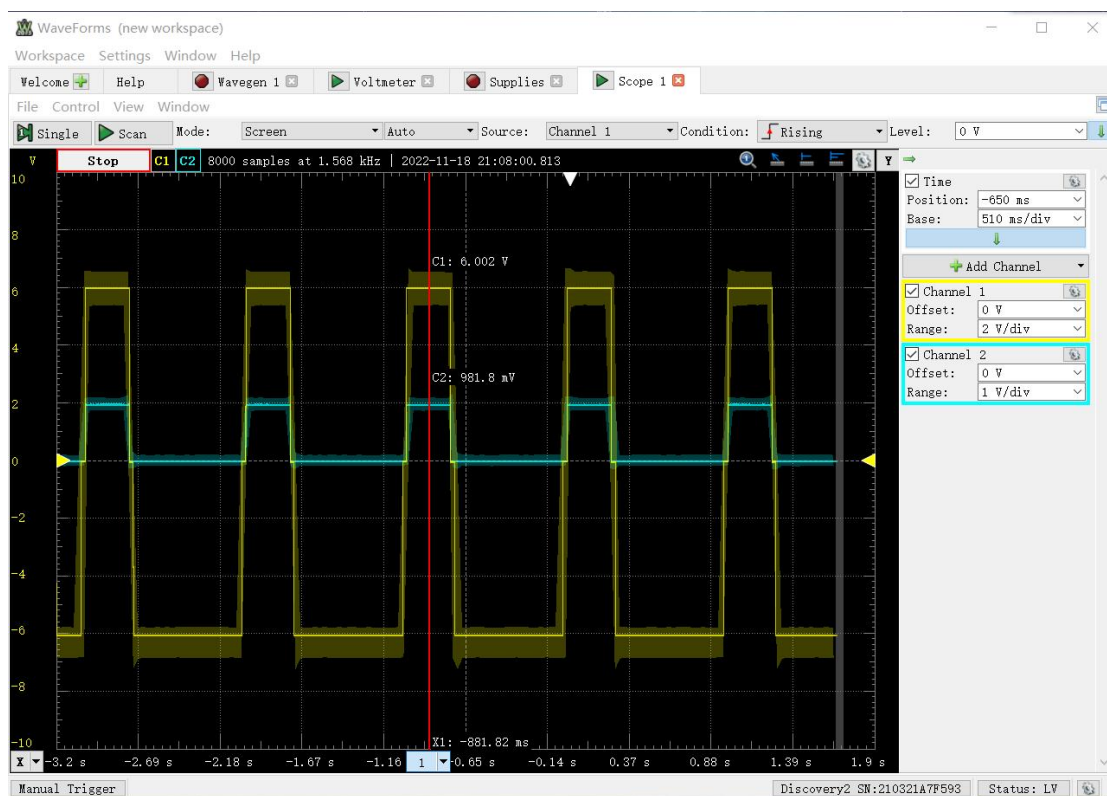


图 22 改变占空比的波形

六：实验分工安排

本次实验由我和王红睿同学合作完成。首先由我设计电路基本结构，王红睿同学对电路提出改进意见，同时对仿真模拟中出现的误差提出修改建议。最终经过冯杰老师的指导，使用低通滤波器减小仿真误差。实体电路的首次搭建由两人共同完成，由于第一次操作不熟练，并未在 WaveForms 上实现出效果，后续由王红睿同学重新搭建电路并实现神经元输出效果。之后我再次搭建电路，并独立验证了实际效果。