

示波器上万花尺的设计

jamescsq47

chensq23@mails.tsinghua.edu.cn

FHYQ-Dong

donghy23@mails.tsinghua.edu.cn

2024 年 12 月 29 日

1 实验设计

1.1 实验原理分析

实验的预期结果是在示波器（XY 模式）上显示内旋轮线。内旋轮线的参数方程如下：

$$\begin{aligned} x(t) &= (1-d)\cos(2\pi f_1 t) + d\sin(2\pi f_2 t) \\ y(t) &= (1-d)\sin(2\pi f_1 t) + d\cos(2\pi f_2 t) \end{aligned} \quad (1)$$

根据内旋轮线的参数方程，需要两路频率不同的正弦模拟信号，为保证图形不转动，频率最好是严格整数比，因此采用振荡器和分频器产生频率精确的正弦信号，之后两路信号分别通过移相器产生两组相位差为 90° 的信号，再交叉互换通过加法器得到要求的 X 信号和 Y 信号。

1.2 理论结果

设计频率比为 3:4， $d = 0.5$ 。使用函数画图软件进行画图，得到理论图案如图 1。

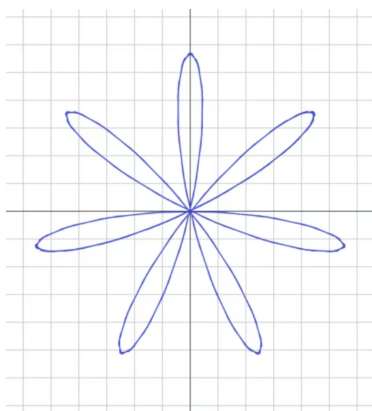


图 1: 频率比 3:4 的理论结果

如果正余弦函数有相位差会导致图案旋转一个角度，但仍是稳定的，不会旋转。

1.3 总体方案设计

电路总共分为 5 个模块，分别是振荡器，分频器，滤波器，移相器和加法器。其中滤波器，移相器和加法器均有 2 个。

- **振荡器**：使用施密特触发器产生方波信号。
- **分频器**：将基频进行 6 分频和 8 分频。
- **滤波器**：采用文氏电桥滤波器结构，在实验中调节电位器，使得放大系数调至略小于 3，实现滤波功能。
- **移相器**：将信号移相 90° 度。
- **加法器**：采用运放加法电路，将移相前后的两路信号相加。

1.4 模块具体分析

1.4.1 振荡器

振荡器采用施密特触发器，电路图如图 2。

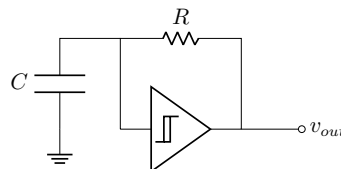


图 2: 振荡器电路图

其原理为电容 C 未充电时，施密特触发器输出高电平，通过电阻 R 给电容 C 充电，当电压超

过一定阈值时，输出翻转，电容 C 通过电阻 R 放电，当电压低于一定阈值时，输出翻转，如此循环。实验使用 CD40106b 芯片作为施密特触发器，当 $R = 10 \text{ k}\Omega$ ， $C = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$ 时，实验测得输出频率为 $f = 8.333 \text{ kHz}$ ，占空比为 50%，峰峰值为 $V_{PP} = 5 \text{ V}$ ，低电平为 0 V 的方波信号。

1.4.2 分频器

分频器采用 74HC161 计数器，电路图如图 3。

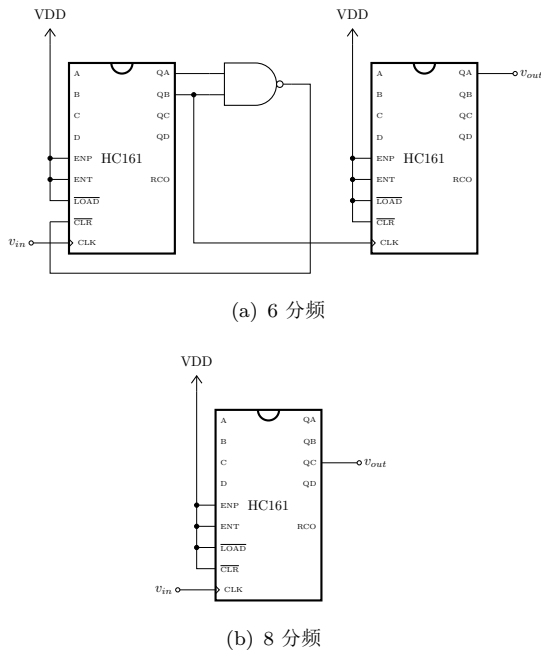


图 3: 分频器电路图

芯片的时钟输入为上一级振荡器的输出。

- **6 分频:** 将 74HC161 的 Q_A 与 Q_B 引脚取与非后接入 \overline{CLR} 引脚。开始时 $Q_A = Q_B = 0$ ， $\overline{CLR} = 1$ ，芯片正常计数，在 CLK 上升沿计数加一。当 $Q_A = Q_B = 1$ ，即计数到 3 时， $\overline{CLR} = 0$ ，芯片清零，重新计数。如此可以得到一个 3 分频的信号，但其占空比不为 50%。因此我们选择再次级联一个 74HC161，将 Q_B 输出的信号再次 2 分频，得到 6 分频且占空比为 50% 的信号。
- **8 分频:** 将 \overline{CLR} 引脚置 1 后直接取 Q_C 的输出即可。

1.4.3 滤波器

滤波器采用文氏电桥滤波器，电路图如图 4。

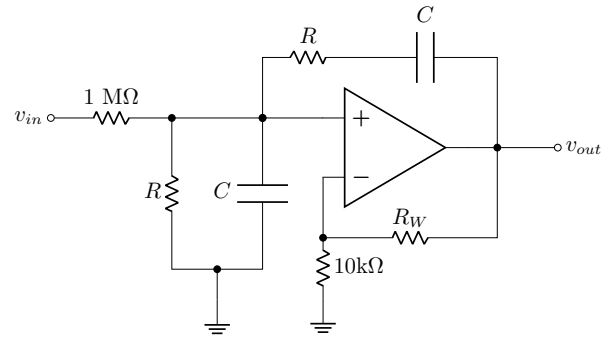


图 4: 滤波器电路图

对运放放大电路

$$\frac{v_{out}}{R_W + 10\text{k}\Omega} = \frac{v_-}{10\text{k}\Omega} \quad (2)$$

$$\Rightarrow A = \frac{v_{out}}{v_-} = 1 + \frac{R_W}{10\text{k}\Omega} \quad (3)$$

对选频网络

$$\frac{v_+}{R \parallel \frac{1}{sC_0}} = \frac{v_{out} - v_+}{R + \frac{1}{sC_0}} \quad (4)$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{v_+}{v_{out}} = \frac{1}{\frac{1}{sCR} + 4 + sCR} \quad (5)$$

为使得 $\beta \in \mathbb{R}$ ，需要

$$sCR + \frac{1}{sCR} = 0 \quad (6)$$

$$\Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC}, f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (7)$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{1}{3} \quad (8)$$

由于 $v_- = v_+$ ，且对于滤波器，环路增益小于 1，因此

$$A\beta = \frac{1 + \frac{R_W}{10\text{k}\Omega}}{3} < 1 \quad (9)$$

$$\Rightarrow R_W < 20\text{k}\Omega \quad (10)$$

实际实验中两个 R 用双联电位器控制，根据示波器图像微调。 R_W 同样使用电位器控制，调整至电路在零输入时不刚好起振即可。

1.4.4 移相器

移相器电路图如图 5。

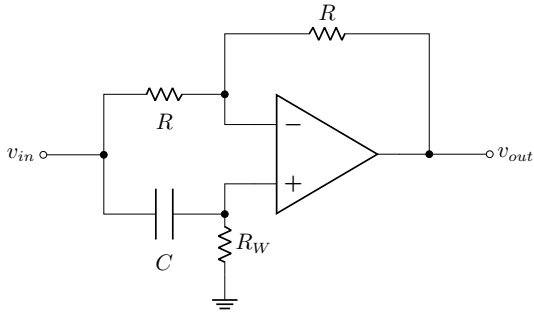


图 5: 移相器电路图

运放处于线性区

$$\frac{v_{out} - v_-}{R} = \frac{v_- - v_{in}}{R} \quad (11)$$

$$\frac{v_{in} - v_+}{\frac{1}{sC}} = \frac{v_+}{R_W} \quad (12)$$

$$v_- = v_+ \quad (13)$$

解得

$$H = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{sCR - 1}{sCR + 1} \quad (14)$$

为使输入与输出移相 90° ，需要

$$H = j \quad (15)$$

$$\Rightarrow R_W = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (16)$$

实验中选择 $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$, $f_1 = 1.388 \text{ kHz}$, $f_2 = 1.041 \text{ kHz}$ 。

1.4.5 加法器

加法器电路图如图 6。

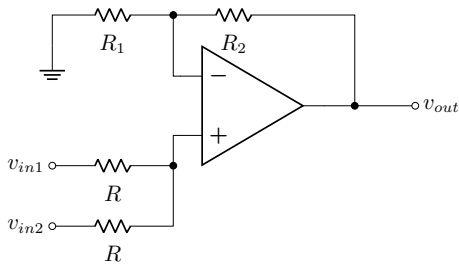


图 6: 加法器电路图

加法器由运放和纯电阻网络组成，无可变电阻。对运放放大电路

$$\frac{v_{out}}{R_1 + R_2} = \frac{v_-}{R_1} \quad (17)$$

$$\Rightarrow A = \frac{v_{out}}{v_-} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (18)$$

对加法电路

$$\frac{v_{in1} - v_+}{R} = \frac{v_+ - v_{in2}}{R} \quad (19)$$

$$\Rightarrow v_+ = \frac{v_{in1} + v_{in2}}{2} \quad (20)$$

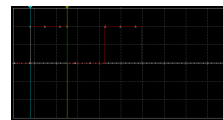
由于 $v_- = v_+$ ，故

$$v_{out} = \frac{R_1 + R_2}{2R_1} (v_{in1} + v_{in2}) \quad (21)$$

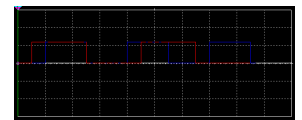
实验中选择 $R = 20 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ 。

2 电路仿真

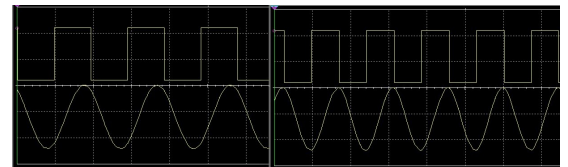
使用 multisim 进行电路仿真，结果如图 7。仿真中双联电位器和 $50 \text{ k}\Omega$ 电位器电阻均使用理论计算值，而在实际实验中通过微调找到最合适的值。各部分单独仿真结果均符合预期，级联之后输入正弦波频率为严格 3:4，输出万花尺图案有 7 瓣，不会转动，也符合预期。



(a) 振荡器



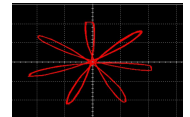
(b) 分频器



(c) 滤波器



(d) 移相器



(e) 最终级联

图 7: 仿真结果

最终波形略有失真,分析原因可能是滤波器输出波形不是严格的正弦波;同时也无法确保两路的输出波形振幅完全相同,实验中滤波器和移相器均使用微调电阻使输出波形为正弦波形,且振幅接近,以最大程度减少失真。

3 实验数据整理和分析

我们依次对各个模块进行了级联测试,在确定了之前模块功能正常后接入新的模块,中间步骤没有拍照。

振荡器和分频器产生的波形均为比较好的方波,经过滤波器后,产生的正弦波有轻微的毛刺,经过移相器后使用示波器的 XY 模式能得到非常好的圆形,加法器工作正常。

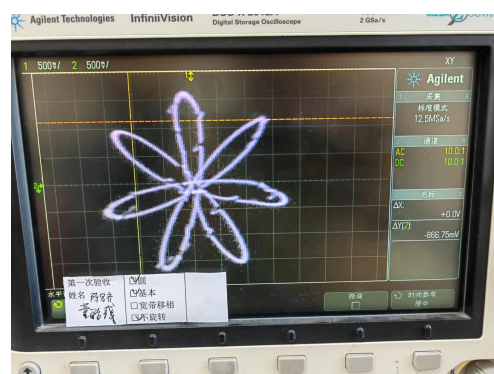


图 8: 最终实验结果

输出的万花尺图案与仿真结果基本一致,但有毛刺现象。

原因分析:一方面可能是滤波器滤波不干净,有一小部分高频分量通过了滤波器;另一方面可能是实际电路搭建的时候走线比较乱,各个元件相互交叉,可能产生了寄生效应。

4 实验总结

实验完成的一波三折,其实在第一次来的时候大部分电路都搭好了,但滤波器因为没有在输入的时候接入一个大电阻,导致输出一直是方波,无法实现滤波功能,调节了两节课多,甚至把滤波器拆了重新搭了一次,终于在第二次的最后找到了错误,在第三次实验的时候完成了实验。

在调节滤波器的时候,双联电位器和 $50\text{ k}\Omega$ 电位器都需要调节,一开始两个一起瞎调,后来发现双联电位器只与频率有关,所以应该先调节双联电位器使得滤波器输出的频率与输入相同,这时候停止给滤波器供电,调节 $50\text{ k}\Omega$ 电位器使得电路刚好起振,这时再把 $50\text{ k}\Omega$ 电位器调小一点,就正好使得振荡器变成滤波器且输出振幅较大了。

通过这次实验,我对电路系统有了更深刻的认识,在搭建时不仅需要考虑各部分的功能,同时也要充分考虑级联之后的效果,各个功能电路之间可能的相互影响,这样才能保证系统的正常工作,在必要的时候也需要通过增加额外的元件减轻相互的影响;同时,我也对噪声有了更深刻的认识,可能最初的一点小误差经过后续的功能电路就会被放大,进而产生显著的影响,所以在设计电路的时候尽可能减小噪声很关键。

A 电路原理图

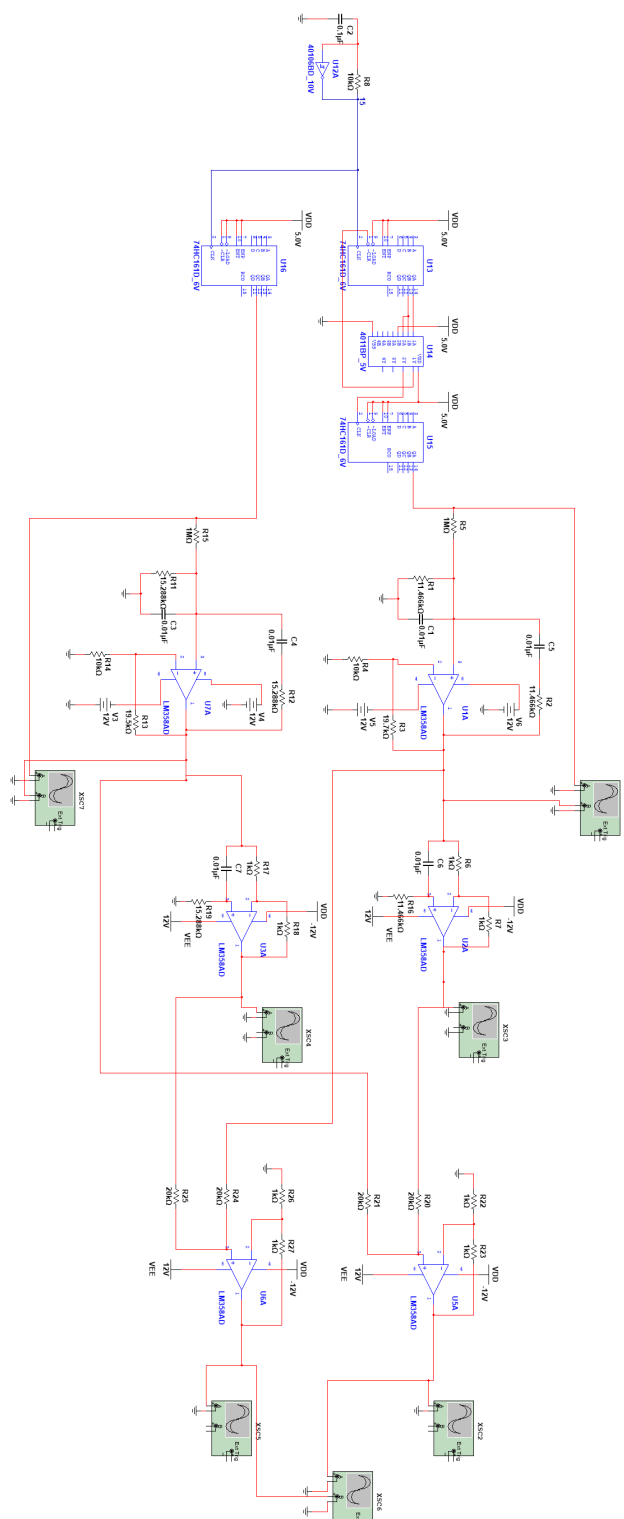


图 9: 电路原理图

多使用了一块面包板和一个 74HC161 芯片。

B 示波器上呈现效果照片

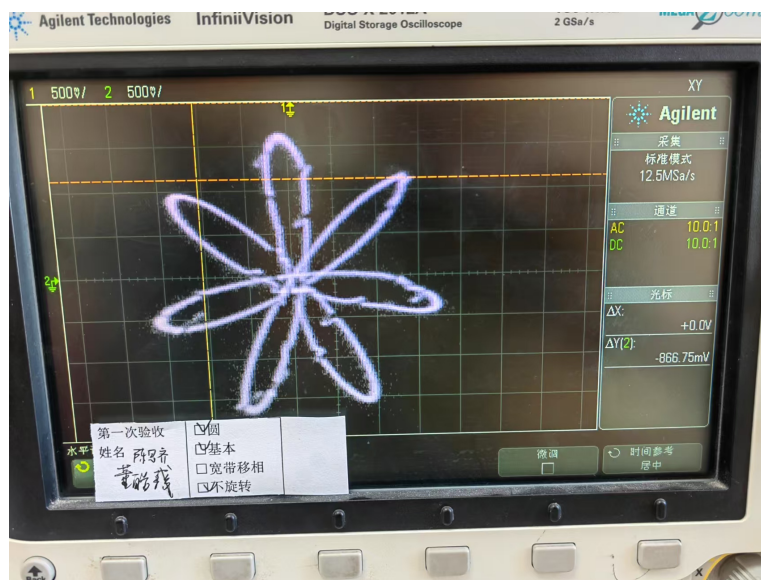


图 10: 最终万花尺图案

我们也尝试了其他的频率比（2:3），也得到了相应的图案。

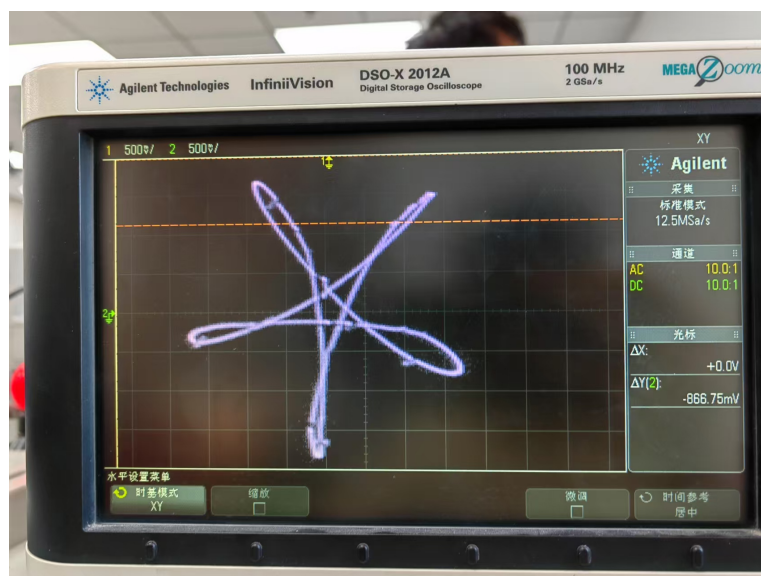


图 11: 另一种万花尺图案

C 电路整体照片

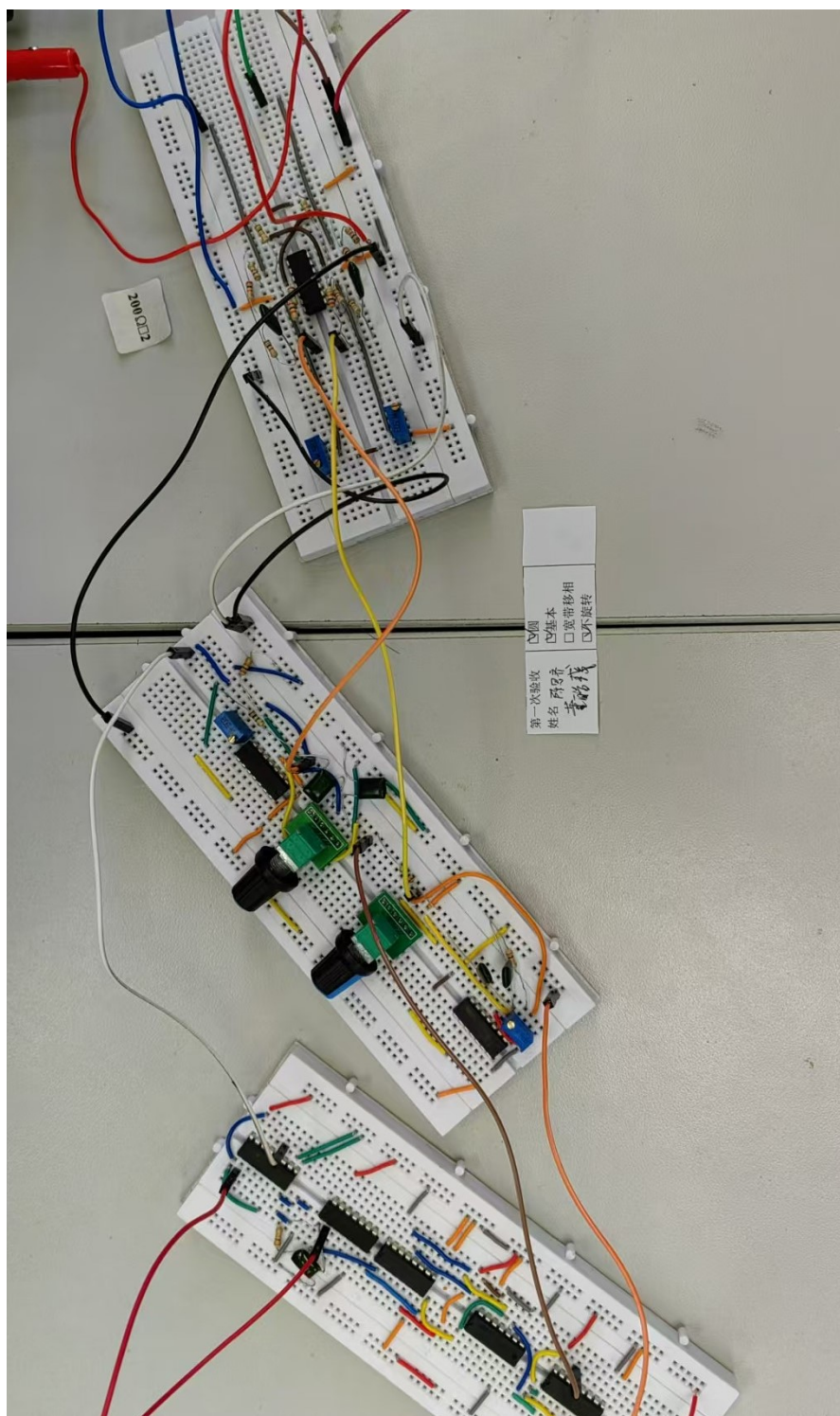


图 12: 实际电路图