



单位代码 10006

分 类 号 TP368.2

北京航空航天大學

B E I H A N G U N I V E R S I T Y

电气综合设计报告

基于 STM32 的数字示波器

学院名称 自动化科学与电气工程学院

专业名称 自动化专业

学生姓名 _____

指导教师 _____

2021 年 12 月



基于 STM32 的数字示波器

学 生：

指导教师：

摘要

示波器是一种能够显示电压信号动态波形的电子测量仪器，它能够将时变的电压信号，转换为时间域上的曲线。本次电气综合设计项目，我们选定了示波器作为题目，设计制作了基于 STM32 的数字示波器。

关键词：示波器，STM32



Digital Oscilloscope based on STM32

Author:

Tutor:

Abstract

An oscilloscope is an electronic measuring instrument that can display the dynamic waveform of a voltage signal. It can convert a time-varying voltage signal into a curve in the time domain. We selected the oscilloscope as the topic for the electrical integrated design project. Then we designed and produced a digital oscilloscope based on STM32.

Key words: Oscilloscope, STM32



目 录

1 设计背景	1
2 总体设计	2
2.1 设计参数	2
2.2 总体设计思路	3
3 硬件设计	5
3.1 整体思路	5
3.2 输入信号调理电路	5
3.2.1 直流/交流耦合/接地电路	5
3.2.2 运放选型	6
3.2.3 x1 / x0.1 信号衰减电路	7
3.2.4 x3.3 / x1.65 / x0.66 信号放大电路	8
3.2.5 +1.65V 电压抬升电路	9
3.2.6 ADC 保护电路	10
3.2.7 整体电路	13
3.3 负压转换电路	14
3.4 校准信号产生电路	16
3.5 按键输入电路	16
4 软件设计	18
4.1 MCU 平台	18
4.2 软件流程设计	18
4.2.1 总体设计	18
4.2.2 滚动模式流程	18
4.2.3 触发模式流程	19
4.2.4 状态管理和模式切换	21



4.3 软件优化	21
4.3.1 屏幕刷新	21
4.3.2 采样数据处理	21
4.3.3 参数断言宏	22
4.3.4 休眠	22
4.4 UI 设计	22
4.4.1 屏幕	22
4.4.2 用户输入面板	23
5 原理图和 PCB 设计	25
5.1 原理图	25
5.2 PCB 设计	25
5.3 成品实物	25
6 仿真与调试	29
6.1 工作演示	29
6.2 遇到的问题及解决方法	29
6.2.1 静态工作点不为 0	29
6.2.2 TVS 导致的信号衰减	30
6.2.3 MODE 按钮异常	31
7 总结	32
参考文献	33



1 设计背景

示波器是一种用途十分广泛的电子测量仪器。它能把肉眼看不见的电信号变换成看得见的图像，便于人们研究各种电现象的变化过程。而实验室的数字示波器虽然性能强大，但是功耗大，笨重且价格昂贵。

低功耗和集成化是未来电子产品设计的趋势。顺应这种趋势，我们设计了具有轻便、低功耗、适中性能、低成本等特点的，基于 STM32 的数字示波器。



2 总体设计

2.1 设计参数

示波器设计为单通道输入，输入端使用通用的 BNC 接头；可选择不同耦合方式（直流耦合/交流耦合/接地等），直流耦合时的输入阻抗为 $1M\Omega$ 。

示波器有六个垂直灵敏度档位，按 1-2-5 规律设置。垂直灵敏度和相应的量程如表2.1所示。

表 2.1 垂直灵敏度及量程

垂直灵敏度 (V/div)	量程 (V)
0.1	± 0.5
0.2	± 1
0.5	± 2.5
1	± 5
2	± 10
5	± 25

STM32F103C6T6 内置的 ADC 的最高采样率为 $1MHz$ 。在此基础上，考虑到屏幕分辨率和 UI 设计，设置时基档位为： $500ms$ 、 $200ms$ 、 $100ms$ 、 $50ms$ …… $20\mu s$ ，也按照 1-2-5 规律设置。

每个时基对应的参数如表2.2和2.3所示

表 2.2 滚动模式时基

采样率 (Hz)	采样周期	时基 (div^{-1})	滚动时间 ¹
40	$25ms$	$500ms$	$8s$
100	$10ms$	$200ms$	$3.2s$
200	$5ms$	$100ms$	$1.6s$
400	$2.5ms$	$50ms$	$0.8s$

示波器总共有四种工作模式：ROLL（滚动）、SINGLE（单次）、NORMAL（常规）、AUTO（自动），其功能和常见的示波器相同。SINGLE / NORMAL / AUTO 模式统称触

¹指波形滚动一屏所需的时间。



表 2.3 触发模式时基

采样率 (kHz)	采样周期	时基 (div^{-1})	刷新时间 ²
1	1ms	20ms	1s
2	500 μs	10ms	0.5s
4	250 μs	5ms	0.25s
10	100 μs	2ms	0.1s
20	50 μs	1ms	50ms
40	25 μs	500 μs	25ms
100	10 μs	200 μs	10ms
200	5 μs	100 μs	5ms
400	2.5 μs	50 μs	2.5ms
1000	1 μs	20 μs	1ms

发模式，在这三种模式下示波器有触发功能，触发方式和触发电平也都可以调节。触发方式可调节为上升/下降沿触发，触发电平在量程范围内连续可调。另外还有 RUN 和 HOLD 两种工作状态，在 HOLD 状态下示波器不更新屏幕上的波形，便于观察。

此外，示波器自带 1KHz 0-3.3V 的方波校准信号，便于调试和校准探头。示波器使用 USB 接口供电，整体功耗大约只有 0.5W。未来还可以进一步拓展与电脑连接的功能。

示波器的硬件成本如表2.4所列，总成本约 65 元。

表 2.4 硬件成本

元器件	成本(估计值)
显示屏模块	40 元
STM32 最小系统板	15 元
其他各种元件	5 元
PCB 板 (小批量每张)	5 元
总成本	65 元

2.2 总体设计思路

项目的总体设计框图如图2.1所示。

其主要模块可分为：输入信号调理电路、负压转换电路、校准信号产生电路、按钮

²指刷新一次波形所需的时间。仅计算了采样所需时间，所以实际刷新一次波形所需的时间会略长。



电气综合设计报告

第 4 页

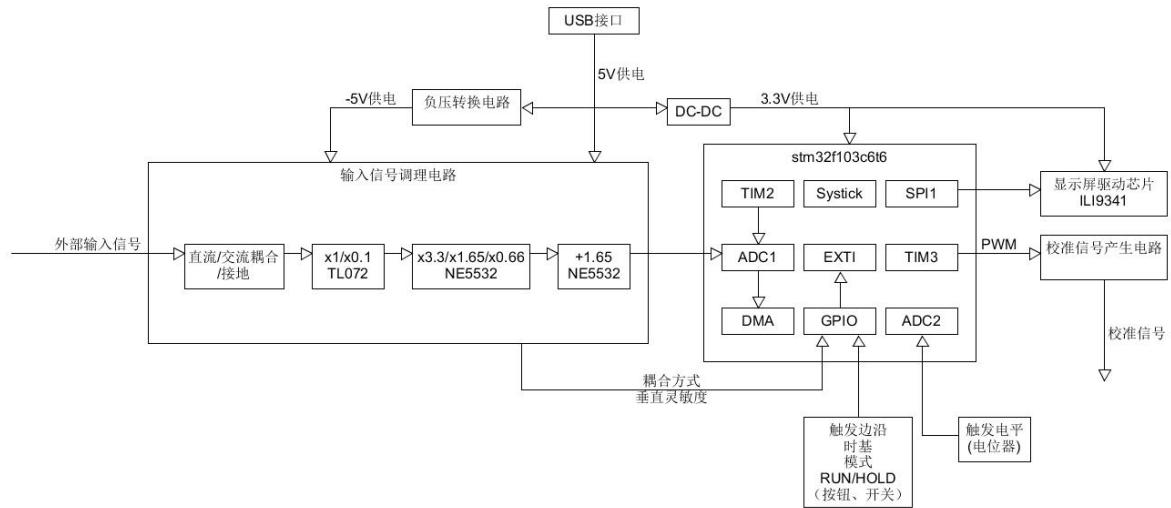


图 2.1 项目总体设计框图

开关等外围电路、STM32F103C6T6 最小系统板、显示屏模块等。



3 硬件设计

3.1 整体思路

示波器的硬件部分主要包括输入信号调理电路和负压转换电路。

STM32F103 内置的 ADC 允许输入的电压范围为 $0 \sim 3.3V$ ，不同幅值范围的外部输入信号，经过输入信号调理电路映射到此范围内，再输入到 STM32 的 ADC。

输入信号调理电路内部分为四个模块：直流/交流/接地耦合电路、 $x1 / x0.1$ 信号衰减电路、 $x3.3 / x1.65 / x0.66$ 信号放大电路、 $+1.65V$ 电压抬升电路。通过拨动开关可对耦合方式及放大倍数的档位进行调整。同时也会将这些信息发送给 STM32。

为了实现这些信号处理，使用了三个运放，第一级运放选用 TL072，后两级选用 NE5532。运放采用 $\pm 5V$ 电源供电。 $+5V$ 供电由 USB 提供， $-5V$ 供电由负压转换电路提供。

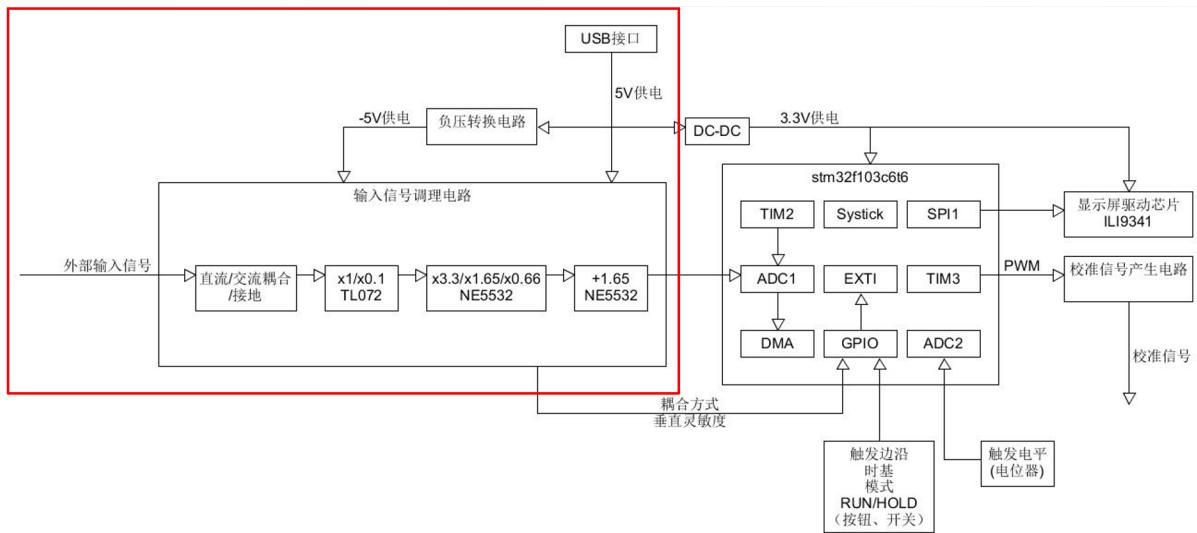


图 3.1 整体框图的硬件部分

3.2 输入信号调理电路

3.2.1 直流/交流耦合/接地电路

直流/交流耦合/接地电路如图3.2所示。输入信号通过电容，滤除低频成分，从而实现交流耦合。电容和下一级的 $1M\Omega$ 电阻事实上构成了高通滤波器。



且其下限截止频率为：

$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} = 1.59Hz \quad (3.1)$$

同时，通过 BNC 接头输入信号的 V_{pp} 最高可达 50V。因而电容规格选取耐压为 50V 的 $0.1\mu F$ 贴片电容。

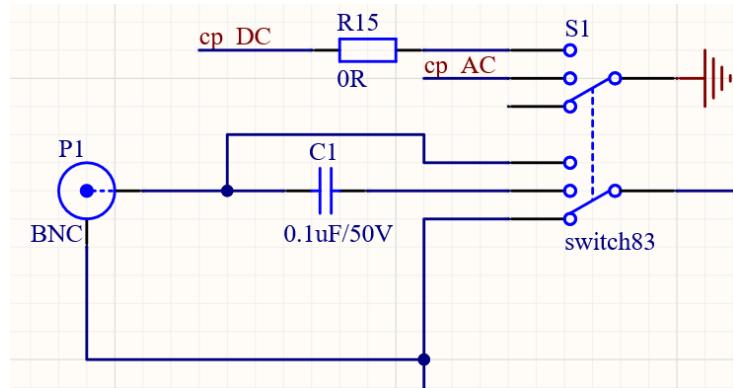


图 3.2 直流/交流耦合/接地电路

3.2.2 运放选型

为保证信号调理电路的带宽满足设计要求，首先应对输入信号调理电路所用的运放进行选型。运放的增益带宽积是选型过程中的重要因素。

STM32 内置的 ADC 的最高采样率为 1MHz，根据采样定理，当采样频率 $f_{s,max}$ 和信号中最高频率 f_{max} 满足

$$f_{s,max} > 2f_{max} \quad (3.2)$$

时，采样之后的数字信号可以完整地保留原始信号中的信息。因此信号调理电路的带宽设计为不小于 500kHz¹。

运放最开始考虑选择在电气技术实践课上使用最多，且价格极为低廉的 LM324。但 LM324 的增益带宽积仅有 1.2MHz^[1]，若三级放大电路全部使用 LM324，当调理电路信号放大倍数最大时，x1 / x0.1 信号衰减电路的上限截止频率为

$$f_1 = 1.2MHz \quad (3.3)$$

¹在实际使用中，输入信号的频率一般不会超过几十 kHz。因为输入信号的频率太高会导致波形难以辨认。



x3.3 / x1.65 / x0.66 信号放大电路的上限截止频率为

$$f_2 = \frac{1.2}{3.3} MHz = 364 kHz \quad (3.4)$$

+1.65V 电压抬升电路的上限截止频率为

$$f_3 = 1.2 MHz \quad (3.5)$$

则整个信号调理电路的上限截止频率为^[2]

$$f_H = \frac{1}{1.1 \sqrt{\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2}}} = 304 kHz < 500 kHz \quad (3.6)$$

显然 LM324 不能满足我们的需求。

经过选型，我们最终选定了 NE5532 音频运算放大器。NE5532 和 LM324 的主要参数对比如表3.1所示^[3]:

表 3.1 NE5532 和 LM324 的主要参数对比

参数	NE5532	LM324
GBW ² (Typ) (MHz)	10	1.2
CMRR ³ (Typ) (dB)	100	80
Slew rate ⁴ (Typ) (V/μs)	9	0.5
Vn at 1kHz ⁵ (Typ) (nV/rtHz)	5	35

NE5532 具有更好的噪声性能、相当高的共模抑制比、优良的输出驱动能力、相当高的单位增益带宽，且价格适中，满足了示波器的信号调理电路的设计要求。

3.2.3 x1 / x0.1 信号衰减电路

电路图如图3.3所示。通过 900kΩ 和 100kΩ 串联分压，输出接电压跟随器，以实现 x1 / x0.1 两档信号衰减和直流耦合时 1MΩ 输入阻抗。

²GBW: 增益带宽积 (Gain-bandwidth product, GBW)

³CMRR: 共模抑制比 (Common-mode rejection ratio, CMRR)

⁴Slew rate: 电压转换速率

⁵即运放在 1kHz 时的电压噪声密度。

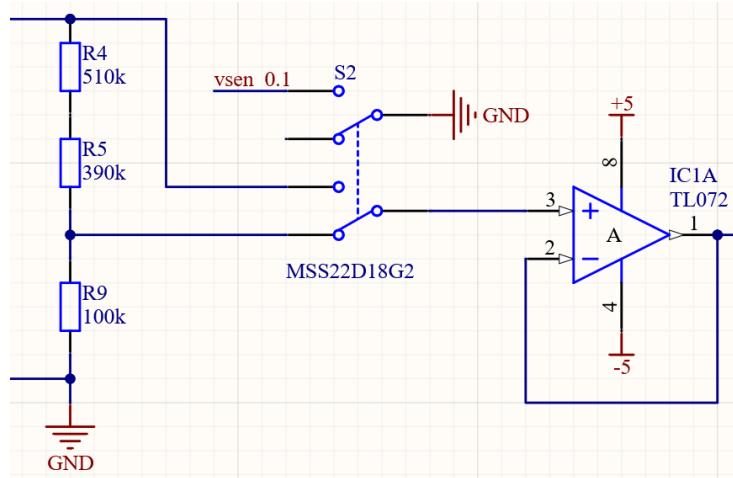


图 3.3 x1 / x0.1 信号衰减电路

实验时发现运放若采用 NE5532，因其输入偏置电流较大 (Typ. 200nA) 且运放输入端有大电阻，产生的电压误差最高可达 0.2V⁶。为解决此问题，应将 NE5532 更换为具有低输入偏置电流的运放。经过选型，TL072 满足需求。

TL072 和 NE5532 的主要参数对比如表3.2所示^[4]:

表 3.2 TL072 和 NE5532 的主要参数对比

参数	TL072	NE5532
GBW (Typ) (MHz)	3	10
Slew rate (Typ) (V/μs)	13	9
输入端结构	JFET ⁷	BJT
Input bias current (Typ) (pA)	65	200000

TL072 的输入偏置电流典型值仅有 65pA，产生误差最大约为 65μV⁸，基本可忽略。

3.2.4 x3.3 / x1.65 / x0.66 信号放大电路

电路图如图3.4所示。此部分将不同范围的输入全部转换到 $\pm 1.65V$ 范围内，故设计为反相比例运算电路。

电阻选值应满足以下关系式

⁶ $200nA \times 1M\Omega = 0.2V$

⁷JFET: 结型场效应晶体管 (Junction Field-Effect Transistor, JFET)

⁸ $65pA \times 1M\Omega = 65\mu V$

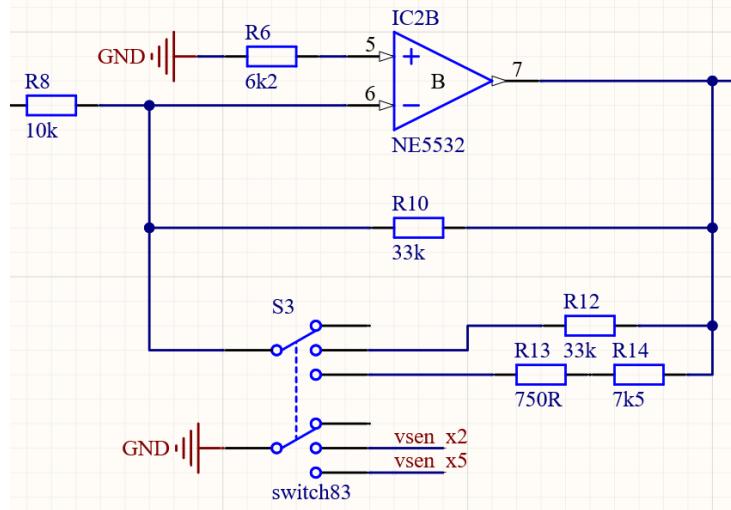


图 3.4 x3.3 / x1.65 / x0.66 信号放大电路

$$\frac{|U_{in}|}{R_{in}} = \frac{1.65V}{R_f} \quad (3.7)$$

由于上一级 TL072 的输出电压范围和负载电阻正相关, 为避免信号的饱和失真, R_8 的电阻值不应太小, 参考供电和运放特性(3.3节), 设计为 $10k\Omega$ 。

代入关系式3.7, 计算得: $R_{f1} = 33k\Omega$, $R_{f2} = 16.5k\Omega$, $R_{f3} = 6.6k\Omega$ 。

最终确定电阻选值为 $R_{10} = 33k\Omega$, $R_{12} = 33k\Omega$, $R_{13} = 750\Omega$, $R_{14} = 7.5k\Omega$ 。

3.2.5 +1.65V 电压抬升电路

电路图如图3.5所示。此部分将 $\pm 1.65V$ 范围内的信号抬升到 $0 \sim 3.3V$ 范围内。

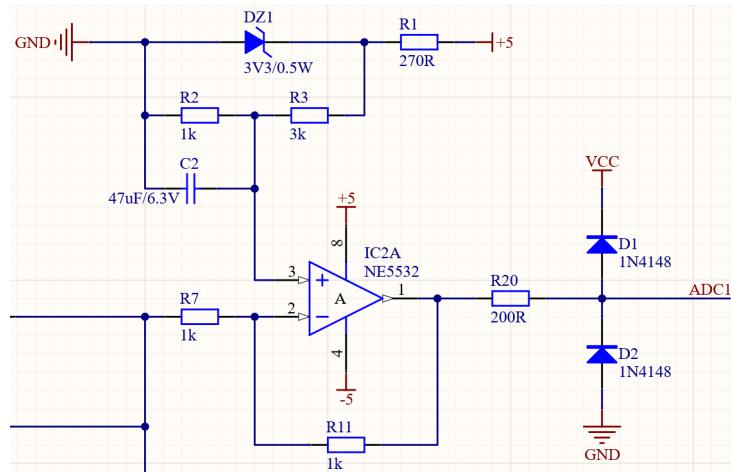


图 3.5 +1.65V 电压抬升电路



运放的同相端需要提供一个 0.825V 的基准电压。考虑到供电可能存在不稳定的情况，因此采用稳压管来产生 3.3V 的基准电压，用电阻分压至 0.825V，同时并联电容以稳定基准电压。

根据 datasheet^[5]，ZMM3V3 型稳压管的稳压电流为 5mA。故 R_1 的选值应满足如下关系式

$$\frac{5 - 3.3}{R_1} \geq 5m + \frac{3.3}{1k + 3k} \quad (3.8)$$

求得 $R_1 \leq 292\Omega$ ，最终选取 270Ω 。

经仿真测试，如图3.6所示，供电下降到 +4.6V 的时候仍可以正常输出 0.825V 基准电压。

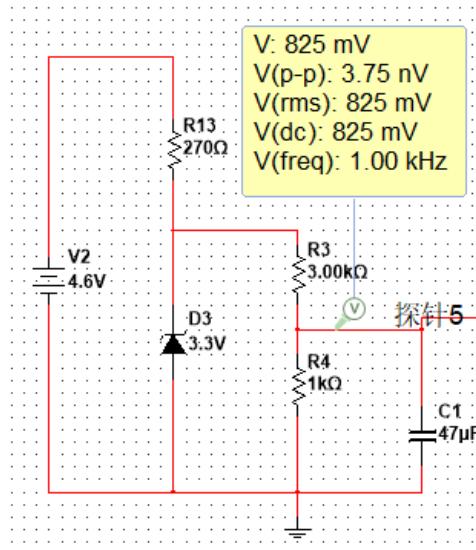


图 3.6 输入信号调理电路

3.2.6 ADC 保护电路

信号调理电路的输出可能达到 $\pm 5V$ ，直接连接至 STM32 的 ADC 存在损坏 ADC 的危险，故需要设计保护电路。此保护电路需要将输出钳位到 $0 \sim 3.3V$ 区间，同时避免引入误差以影响 ADC 采样精度。

将输出钳位到固定区间可采用二极管钳位电路实现，电路如图3.7所示。

经过选型，我们选取了小型高速开关二极管 1N4148 来搭建二极管钳位电路。

根据 datasheet^[6]，1N4148 反向耐压可达 75V。常温下的漏电流仅有 5nA 左右，即使考虑到工作状态时可能发热，其漏电流也应当不会超过 100nA。示波器使用 STM32

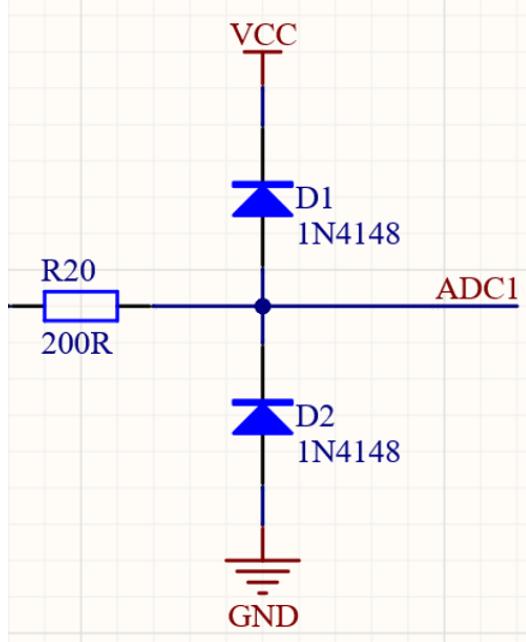


图 3.7 ADC 保护电路

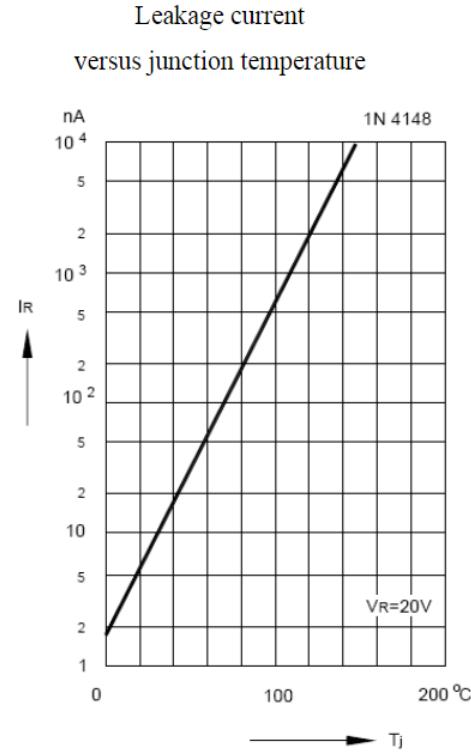


图 3.8 1N4148 漏电流和温度的关系曲线

内置的 12 位 ADC，不过程序中只使用了高 8 位，故 ADC 的分辨率为

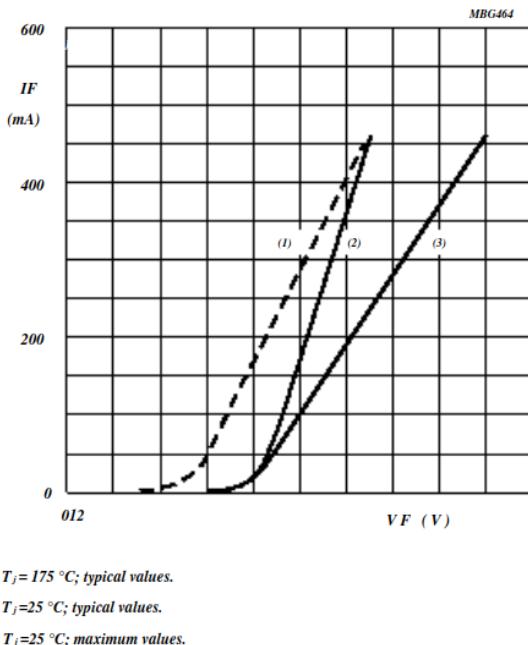
$$U_{ADC} = \frac{3.3V}{2^8} \approx 0.01V \quad (3.9)$$

1N4148 工作状态下漏电 I_L 不超过 100nA。上下的 1N4148 的漏电流可能会相互抵消，不过保守考虑，假定没有抵消，只计算一侧的漏电流， R 的选值应满足以下关系式

$$I_L R < U_{ADC} \quad (3.10)$$

解得 $R < 100k\Omega$

考虑到运放的输出最大可达到 $\pm 5V$ ，为避免 1N4148 通过的电流过大， R 的选值也不应过小。1N4148 的正向平均电流为 200mA，根据图3.9，此时正向电压约为 1V。 R 的



(1) $T_j=175\text{ }^{\circ}\text{C}$; typical values.
(2) $T_j=25\text{ }^{\circ}\text{C}$; typical values.
(3) $T_j=25\text{ }^{\circ}\text{C}$; maximum values.

Fig.3 Forward current as a function of forward voltage.

图 3.9 1N4148 正向电流和正向电压的关系曲线

取值应满足

$$\frac{U_{max} - (V_{CC} + V_F)}{R} \leq 200mA$$
$$\frac{|U_{min}| - V_F}{R} \leq 200mA \quad (3.11)$$

解得 $R \geq 20\Omega$

同时，考虑到二极管的电容效应，此电阻会和 1N4148 的结电容构成一个低通滤波器。根据 datasheet^[6]，1N4148 的结电容最大为 4pF。信号调理电路的带宽设计为不小于 500kHz，所以 R 的取值应满足

$$f_H = \frac{1}{2\pi R(2C)} > 500kHz \quad (3.12)$$

解得 $R < 39.8k\Omega$

综合以上三个因素，此处 R 的选值为 200Ω。



3.2.7 整体电路

综合以上设计，输入信号调理电路整体如图3.10所示

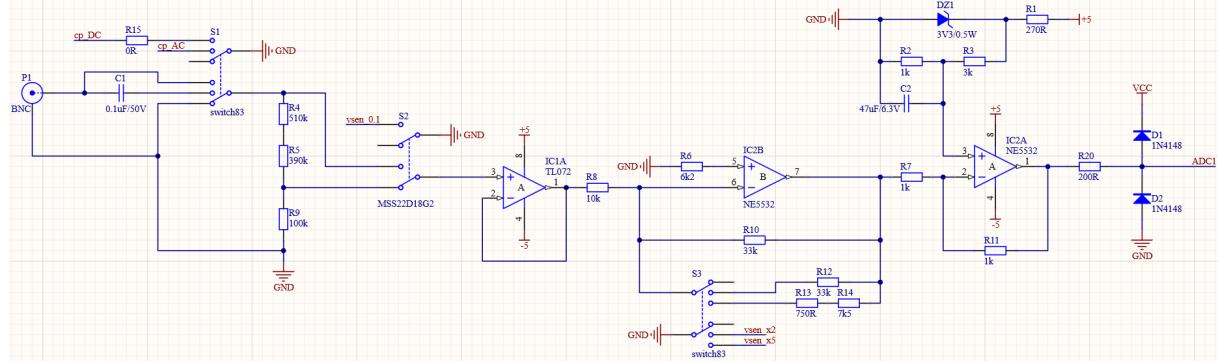


图 3.10 输入信号调理电路

当调理电路信号放大倍数最大时, $x_1 / x_{0.1}$ 信号衰减电路的上限截止频率为

$$f_1 = 3\text{MHz} \quad (3.13)$$

x3.3 / x1.65 / x0.66 信号放大电路的上限截止频率为

$$f_2 = \frac{10}{3.3} MHz \approx 3 MHz \quad (3.14)$$

+1.65V 电压抬升电路的上限截止频率为

$$f_3 = 10 \text{MHz} \quad (3.15)$$

保护电路构成的低通滤波器的上限截止频率为

$$f_4 = \frac{1}{2\pi R(2C)} = 99 MHz \quad (3.16)$$

其对整体的截止频率的影响可以忽略。

整个信号调理电路的上限截止频率为

$$f_H = \frac{1}{1.1 \sqrt{\frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2}}} = 1.90 MHz > 500 kHz \quad (3.17)$$



此时信号调理电路的上限截止频率大于 500kHz，满足设计需求。

经仿真测试，输入信号调理电路的幅频特性曲线和相频特性曲线如图所示，与计算相吻合，满足了设计需求。

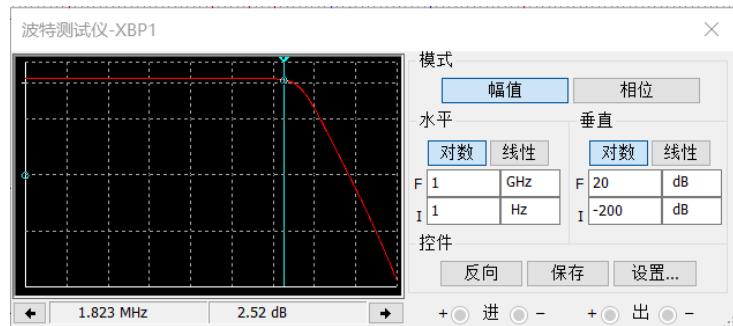


图 3.11 幅频特性曲线

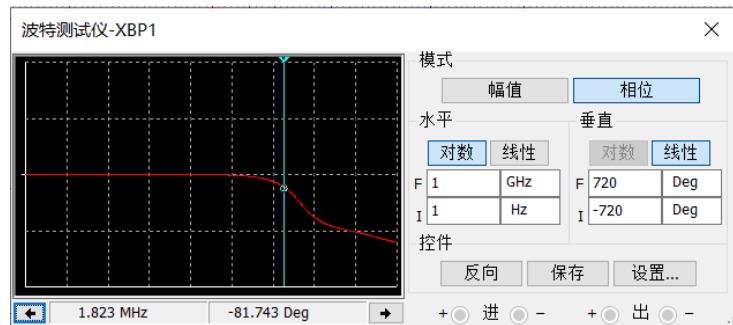


图 3.12 相频特性曲线

3.3 负压转换电路

输入信号调理电路中运放需要正负双电源供电。示波器设计为 USB 5V 供电，因此需要一个负压转换电路，将 +5V 输入转换为 -5V 输出，且具有一定的带载能力。

信号调理电路中的运放所需供电电流如表3.3所列。

表 3.3 运放所需供电电流

	Supply current (Typ)
NE5532	8mA
TL072	2.8mA

故负压转换电路需提供大约 11mA 的供电电流。



经查阅资料，ICL7660 可实现 +5V 输入转-5V 输出的需求。根据 datasheet^[7]，设计 ICL7660 负压转换电路如图3.13所示。

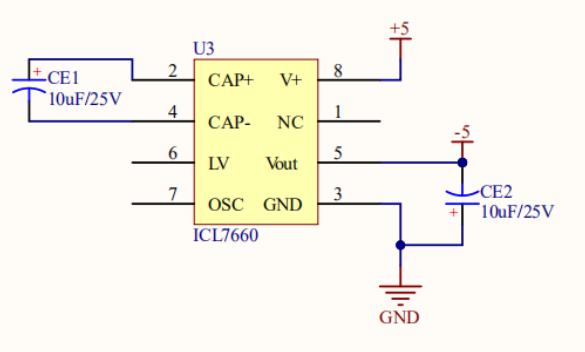


图 3.13 ICL7660 负压转换电路

经计算，第一级 TL072 需要输出的负电压最大，为-2.5V。负压供电应保证 TL072 能够输出到此范围。根据 +5V 电压输入时 ICL7660 输出电压与输出电流的关系曲线，当 ICL7660 负载电流约为 11mA 时，输出负电压略大于 4V。

根据负载电阻为 $10\text{k}\Omega$ 时 TL072 最大峰值输出电压与供电电压的关系曲线，供电大于 4V 时 TL072 最大峰值输出电压可以达到-2.5V，满足需要。故选用 ICL7660 作为负压转换电路的核心芯片。

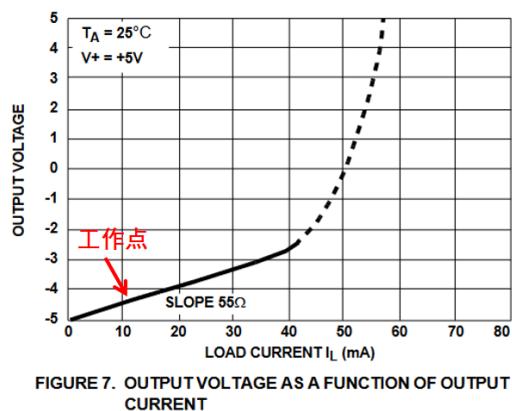


FIGURE 7. OUTPUT VOLTAGE AS A FUNCTION OF OUTPUT CURRENT

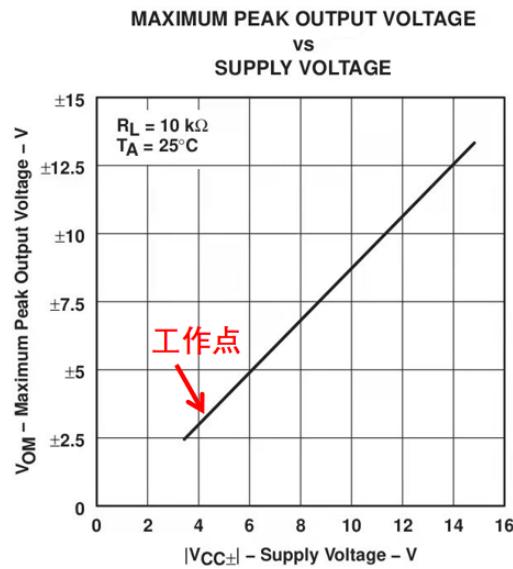


图 3.15 TL072 输出电压电流的关系曲线



3.4 校准信号产生电路

校准信号源于 STM32 定时器输出的 1kHz PWM 波。

最开始拟通过将 PWM 波输入滞回比较器产生固定幅值的方波信号。但是经过对市面上各种型号的示波器的调查，我们发现示波器的校准信号的幅值并没有统一的标准。所以放弃了用滞回比较器控制幅值的方案，改为 PWM 波接电压跟随器输出。

之后在设计 PCB 板，布线的时候遇到了一些困难。考虑到示波器的校准信号不要求很大的带载能力，电压跟随器也不是必须的。最后就简化成了直接输出。

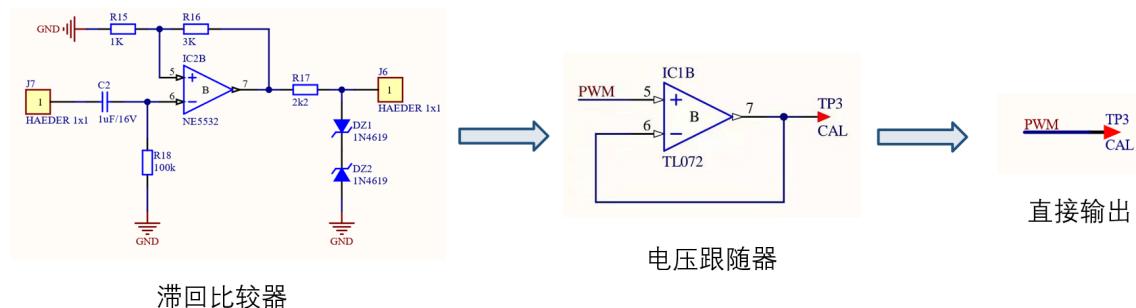


图 3.16 校准信号产生电路设计路线

3.5 按键输入电路

按键输入电路如图3.17所示。所接 GPIO 配置为内部上拉。

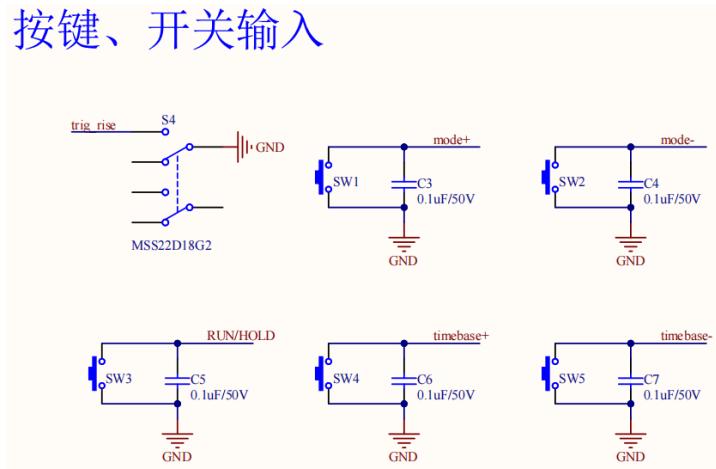


图 3.17 按键、开关输入电路

考虑到按键所用开关为机械弹性开关。当机械触点断开、闭合时，由于机械触点的



弹性作用，一个按键开关在闭合时不会立即稳定接通，在断开时也不会立即断开。在闭合及断开的瞬间均伴随有一连串的抖动。故应对按键输入做消抖处理。

最开始我们选择使用硬件消抖的办法。查阅资料，将按键与滤波电容并联后接入 STM32 的 GPIO 即可实现硬件消抖。

为消除按键抖动，滤波电容越大越好，但电容增大将增大信号的上升时间。为不影响按键电路的正常功能，需将上升时间控制在 10ms 以内。

查阅 datasheet^[8]，STM32 的内部上拉等效电阻 R 为 $40\text{k}\Omega$ ，输入引脚输入阻抗 R_i 估算中可视为无穷大。整个硬件消抖电路可等效为一阶电路系统，此系统的时间常数越大则上升时间越大，上升时间过大将影响按键的正常使用。考虑到此一阶电路的时域响应形为

$$u(t) = A + \frac{B}{T}e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.18)$$

其响应过程为单调上升，上升时间约为 $2.2T$

故时间常数 T 应满足

$$T = \frac{RR_iC}{R_i + R} < \frac{10\text{ms}}{2.2} \quad (3.19)$$

解得 $C < 0.11\mu\text{F}$

对下降时间的分析同理。综合以上因素，滤波电容选取为 $0.1\mu\text{F}$ 。

不过在之后的测试中发现，硬件消抖的效果较差。所以最终还是采用了软件消抖的方式。



4 软件设计

4.1 MCU 平台

STM32 是由意法半导体集团基于 ARM Cortex-M 内核研制和生产的一系列 32 位微控制器。STM32 系列 MCU 具有低成本、低功耗、高性价比的优势，受到了广泛的好评。2009-2014 年总出货量已超过 10 亿片，占据了全世界大部分基于 Cortex-M 内核的 MCU 市场。

STM32 在各方面的强大优势契合了本项目的需求。考虑到成本、代码体积、性能需求等，本项目选用了 STM32 系列中的 STM32F103C6T6 作为项目的软件平台。

STM32F103C6T6 基于 ARM Cortex-M3 内核，时钟频率最高可达 72MHz，集成了 32K 的 Flash 和 10K 的 SRAM。片上集成的外设有 37 个 GPIO、2 个最高 1MHz 采样率的 12 位 ADC、7 通道 DMA（直接内存访问控制器）、6 个定时器、I2C 接口、2 个 USART 接口、SPI 接口、CAN 总线、USB 接口^[8]。

4.2 软件流程设计

4.2.1 总体设计

软件代码已开源于 <https://github.com/Narukara/Oscilloscope>。

粗略的软件总体框图如图4.1所示。软件设计基于 STM32 标准库，使用 C 语言开发。在标准库的基础上根据需求设计了各外设的驱动程序。在 SPI 驱动的基础上，设计了显示屏芯片 ILI9341 的驱动，又进一步设计了 GUI 管理模块。示波器状态管理模块基于多个外设驱动，负责接受用户输入，管理垂直灵敏度、时基等状态信息。最后在此基础上，实现了示波器的主程序。

4.2.2 滚动模式流程

示波器具有四种工作模式。其中，在滚动模式下采样率很低，CPU 处理数据和屏幕显示波形的速度高于 ADC 采样的速度，所以滚动模式的程序较为简单，程序的流程如图4.2所示。

当进入滚动模式时，CPU 首先对 ADC 和 Systick（系统节拍定时器）进行配置，完

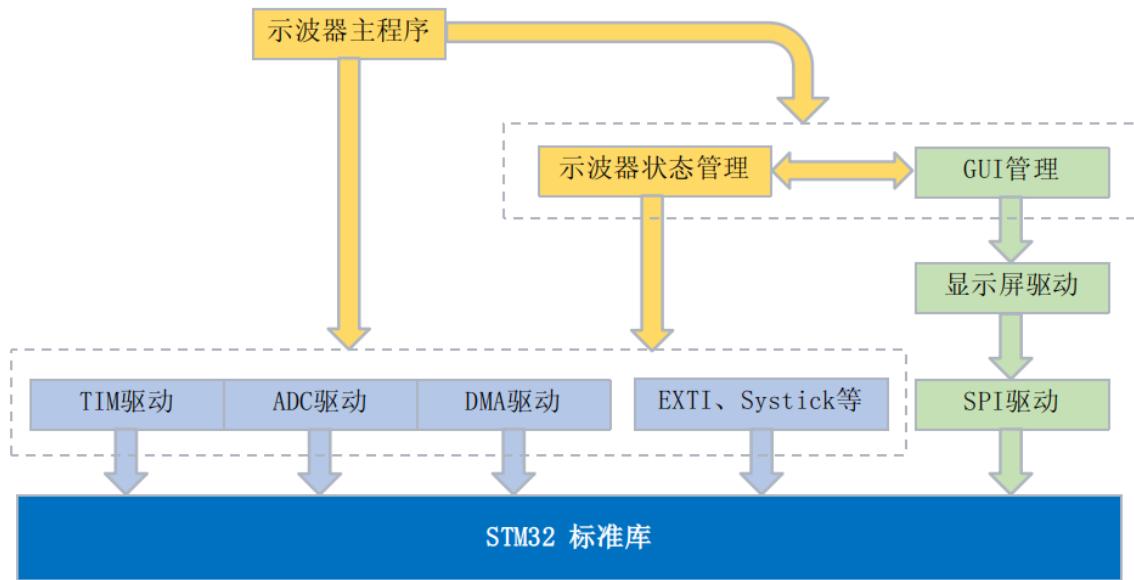


图 4.1 软件总体框图

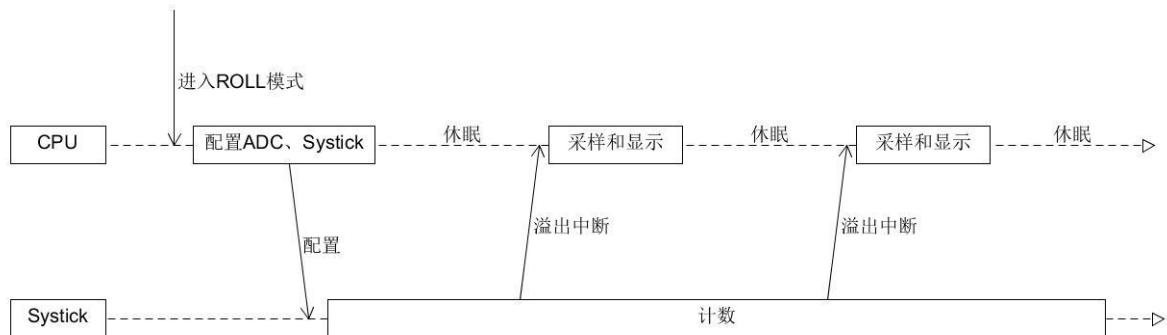


图 4.2 ROLL 模式流程

完成后调用专门的指令，进入休眠状态。而 Systick 会不断地进行计数，每当计数产生溢出时，触发一个中断，从而唤醒 CPU。CPU 被唤醒后，就会调用 ADC 进行一次采样，之后将采样结果显示到屏幕上，之后再次进入休眠状态。如此循环。

4.2.3 触发模式流程

在触发模式下，由于采样率比较高，CPU 处理数据和屏幕显示波形的速度低于 ADC 采样的速度，因此不可能采用与滚动模式类似的流程。一个简单的解决方法是：CPU 直接控制 ADC 进行批量的采样，然后 CPU 处理数据，显示波形，如此循环。但这会导致较大的死区时间¹，降低波形捕获率，并影响偶发信号的捕获成功率。对此，我们基于

¹死区时间是指，数字示波器因需要对样本进行处理，而在一段时间内不能进行采样。这会导致偶发信号的遗漏。



STM32F103C6T6 强大的外设，精心设计出了触发模式下，CPU 处理和 ADC 采样并行的工作流程。

在触发模式下，采样流程如图4.3所示。在滚动模式下，程序每次只采一个样本。而在触发模式下，CPU 会配置 TIM、ADC、DMA，使这三个外设协同工作，批量地进行采样，并且把采样结果送至内存中指定的缓冲区。且采样期间无需 CPU 参与，CPU 可以去处理其他工作。

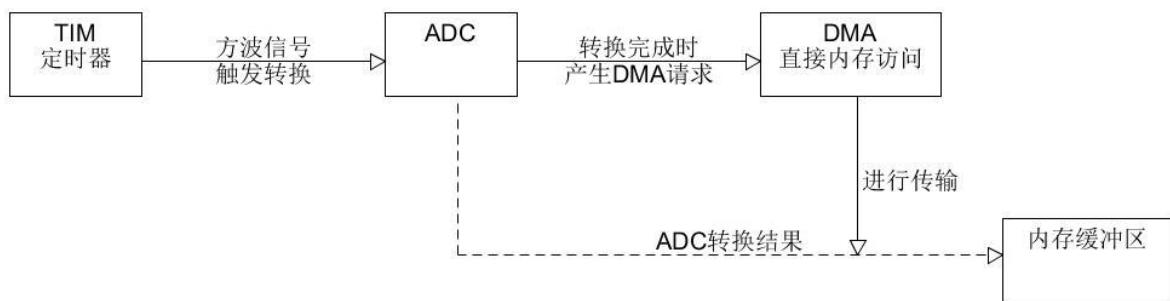


图 4.3 触发模式采样流程

在此基础上，触发模式下采样和处理的流程如图4.4所示。在进入触发模式后，CPU 首先会配置 TIM、ADC、DMA，进行一批次的采样，结果送入缓冲区 1。采样完成后，CPU 再次配置三个外设，进行下一批次的采样，结果送入缓冲区 2。而在此期间，CPU 就会根据触发设置，处理缓冲区 1 内的数据，并刷新显示屏上的波形。在 CPU 和三个外设都完成了工作之后，就交换缓冲区，再次进行采样和处理的流程。如此一来，就实现了 CPU 和 TIM-ADC-DMA 的并行工作，减小了死区时间，极大地提升了示波器的波形捕获率，提高了偶发信号的捕捉成功率。

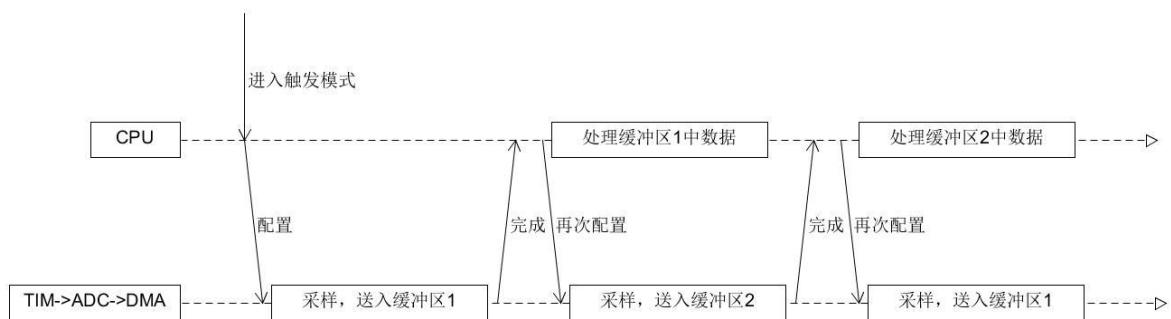


图 4.4 触发模式采样和处理流程



4.2.4 状态管理和模式切换

用户在任何时刻都可能按下按键、拨动开关，这会导致示波器状态的改变。为了使程序设计简单，用户的输入并不会立即生效，而是先被保存在一个暂存区。这个暂存区就是由图4.1中的示波器状态管理模块管理的。

示波器的主程序事实上是一个大循环。在这个循环中，程序只会在某些固定的位置，把暂存区内的状态更新到主程序中。这样一来，就无需担心状态设置可能随时会被更改。程序只需在固定的位置，在确定的状态下处理状态的更新。

但是这样设计也会造成一个问题：用户输入可能无法得到及时的响应。在示波器的某些时基下²，由于主程序循环较慢，用户输入会有短暂的卡顿现象出现。

4.3 软件优化

为了提高性能，提升用户体验，示波器的程序经过深度的优化。代码中有大量细节都是经过反复斟酌打磨出的。除了上面提到过的 CPU 与 ADC 并行，还有很多重要的优化，如下面所列举。

4.3.1 屏幕刷新

在初期的示波器软件中，波形的显示是通过对整个屏幕刷新实现的。但是不难发现，每次刷新波形，屏幕上只有一小部分像素需要改变，不必刷新全屏。

之后通过研究屏幕驱动芯片 ILI9341 的 datasheet^[9]，发现可以通过软件设置更新区域的坐标，于是将显示波形的程序设计为仅会消除上一次的波形点，仅显示本次的波形点，也就是只更新必要的像素点。同样地，在更新屏幕上的其他信息，如垂直灵敏度、时基时，也只会进行局部的刷新。这一优化显著提升了屏幕刷新速度。

4.3.2 采样数据处理

STM32F103 的外设 ADC 为固定的 12 位分辨率，而屏幕的垂直分辨率仅有 240，即最大只需 8 位的分辨率。

在触发模式中，TIM 触发 ADC 批量采样，DMA 送入内存缓冲区，会占用一定的空间。传统的实现方式是：因为 ADC 的采样结果有 12 位，所以编程设置 DMA 每次传送 2 字节的数据。但在本应用中，8 位数据（1 字节）就足够。每次传送 2 字节数据，不仅

²主要是触发模式的 20ms、10ms、5ms 时基。



会使缓冲区占用 2 倍的内存，还要求 CPU 在后续的处理中进行额外的操作以丢弃低位。

于是在 DMA 和 ADC 的驱动程序中，采用了一些非常规的方法：首先设置 ADC 的采样结果在数据寄存器 (ADC->DR, 2 字节) 内左对齐，即高 8 位在高字节内，低 4 位在低字节的高半字节内。然后在配置 DMA 时，将地址直接指定为 ADC->DR 的高字节地址，且每次传送 1 字节数据。这样，DMA 每次就仅会传送采样结果的高 8 位，丢弃低 4 位。这样做不仅减小了缓冲区占用空间，也自然完成了数据的截断。

在示波器程序中，每次批量采样 1000 个点，且程序中有 2 个缓冲区。优化前缓冲区总占用内存为 4kb，优化后为 2kb。考虑到 STM32F103C6T6 仅有 10kb 内存，这个优化的效果还是相当显著的。

4.3.3 参数断言宏

STM32 标准库自带了一种检查参数是否合法的功能。在编译参数中，通过定义 USE_FULL_ASSERT 宏，可以使能此功能。但是这种参数检查是在运行时进行的，既耗费时间又会使代码体积膨胀。一般而言，只会在程序设计的过程中使能此功能，确保程序正确，而在正式发布时关闭。

在使能参数检查功能的时候，代码 text 段大小会达到约 38kb，已经超出了 STM32 F103C6T6 的 Flash 的容量。而在失能此功能时，代码 text 段大小约 15kb。不仅如此，运行速度也有不小的提升。

4.3.4 休眠

在滚动模式和触发模式中，都会出现 CPU 等待定时器溢出或外设完成工作的情形。在这种情形下，最简单的实现方式就是忙等待，即 CPU 不断查询外设状态，直至可以继续运行。而在示波器程序中，这种情形一律采用了休眠并等待中断唤醒的方式，一定程度上降低了系统功耗。

4.4 UI 设计

4.4.1 屏幕

示波器使用一块 2.4 寸的 TFT (薄膜晶体管) 屏，分辨率为 320x240，支持 65K 色。图 4.5 展示了屏幕上会显示的全部内容。其中波形显示区垂直方向划分 10 格，水平方向划分 16 格。四角和顶部显示各种信息：左上为模式/触发方式，中上为触发电平，右上



为 RUN/HOLD，左下为垂直分辨率/耦合方式，右下为时基。

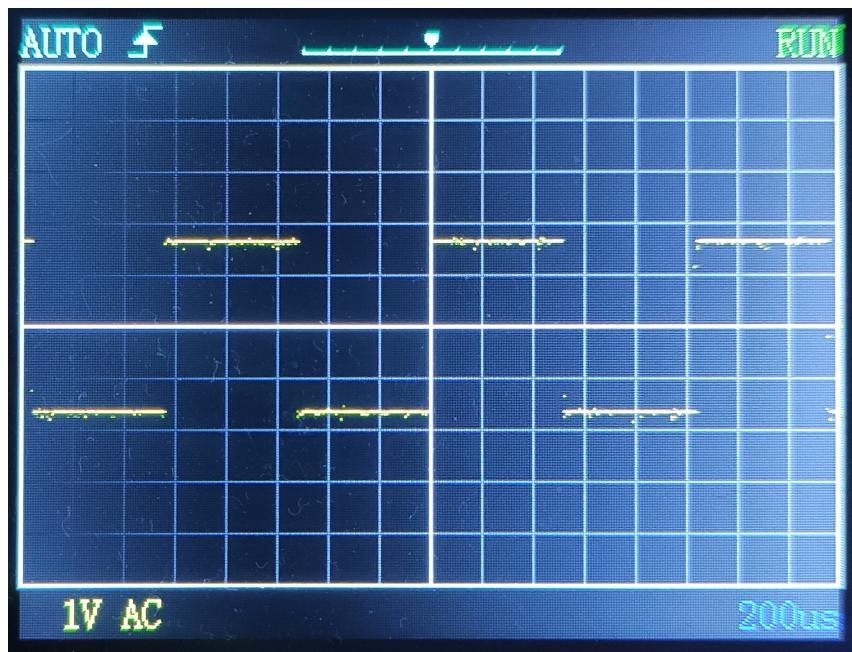


图 4.5 示波器屏幕

4.4.2 用户输入面板

图4.6展示了 PCB 板上的用户输入区。板上的丝印提示了按键、开关的功能。

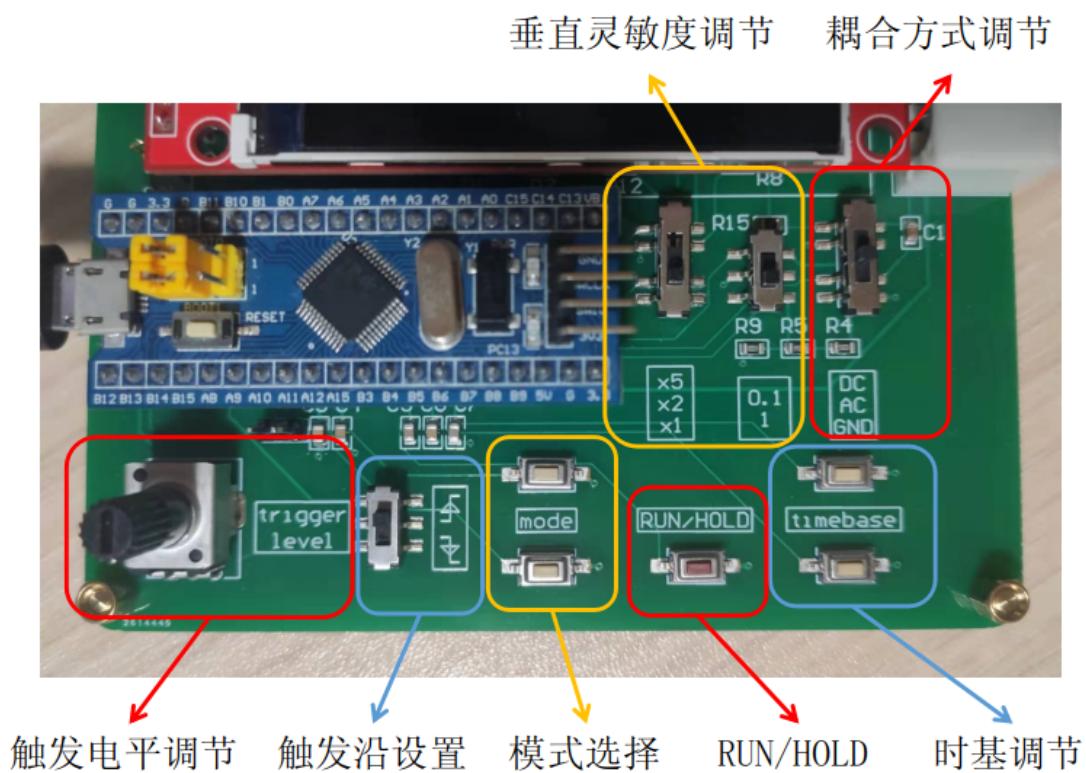


图 4.6 用户输入面板



5 原理图和 PCB 设计

5.1 原理图

整个原理图如图5.1所示。

5.2 PCB 设计

PCB 设计如图5.2所示。尺寸为 10.5cm x 9.5cm，设计为双层板。在 Bottom 层铺铜，作为地平面。

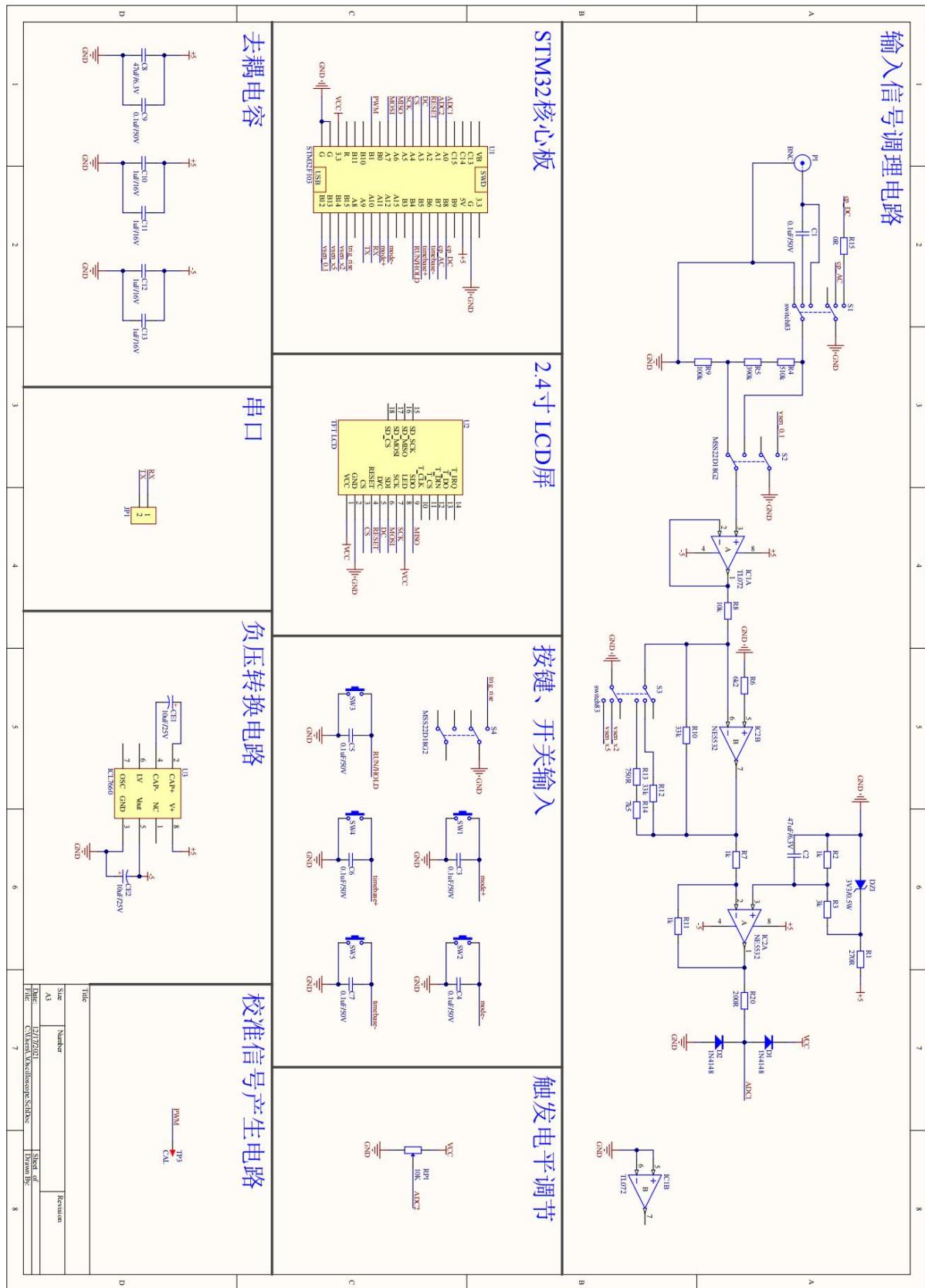
在设计时大量采用贴片元件，原因在于贴片元件：

- 1、 电气性能好；
- 2、 节省 PCB 板空间；
- 3、 便于使用热风枪焊接。

5.3 成品实物

焊接完成实物如图5.3所示。

安装屏幕和 STM32 最小系统板后如图5.4所示。可以看出，大部分信号调理电路都隐藏在屏幕下，节省了 PCB 板空间。示波器通过 STM32 核心板上的 USB 接口供电，可以接到电脑、移动电源或一般的充电器上，无需插座，使用方便。



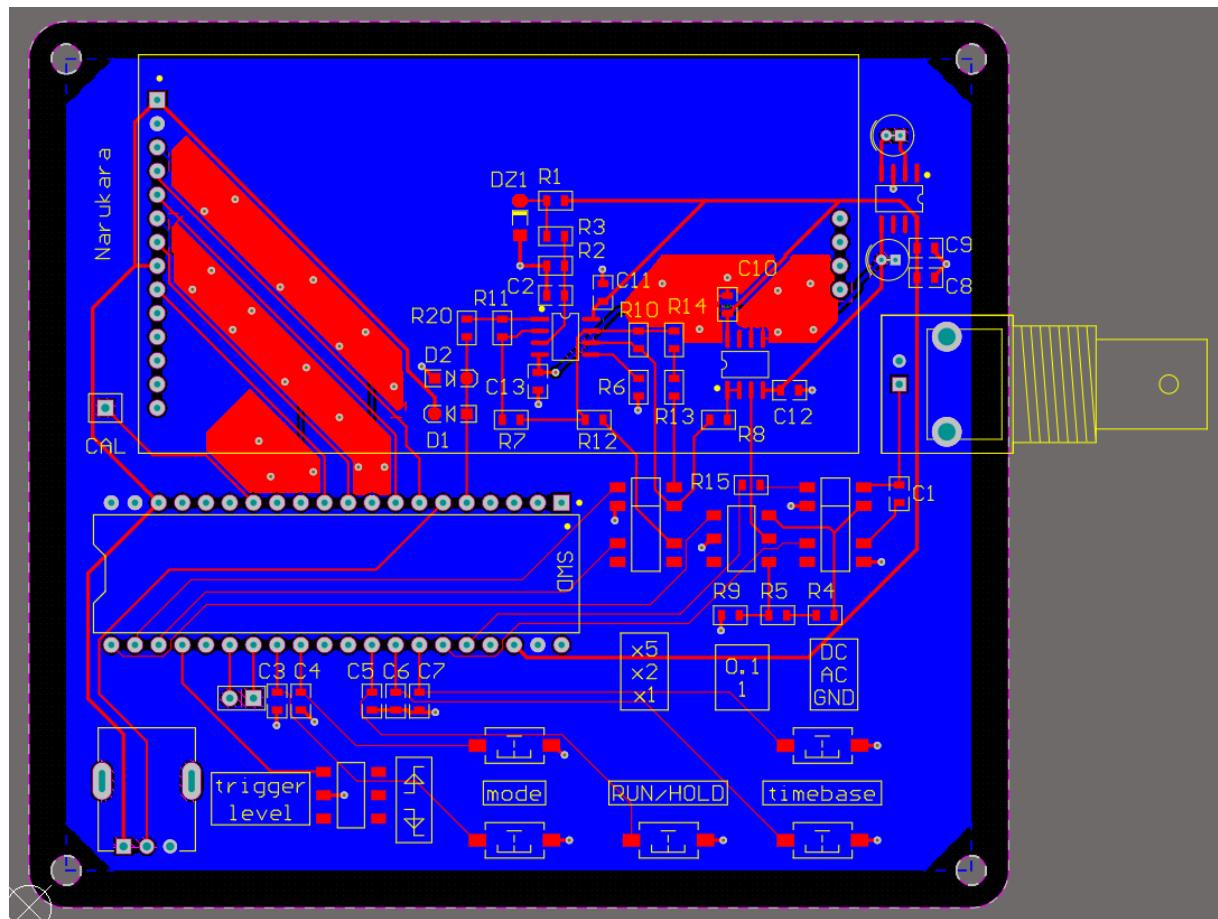


图 5.2 PCB 设计图

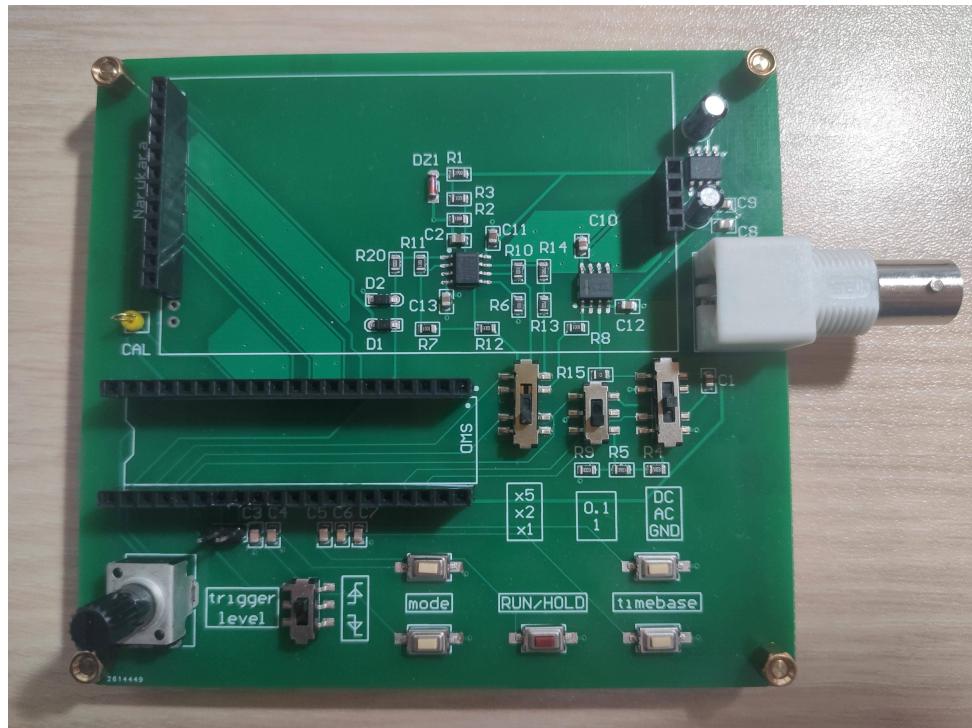


图 5.3 焊接完成实物图

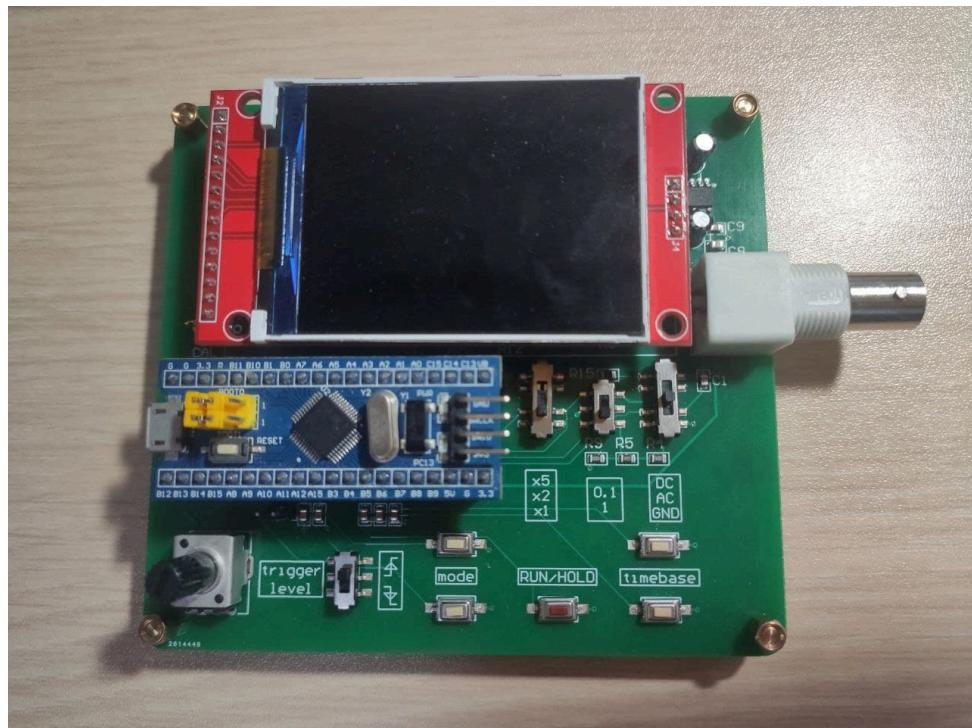


图 5.4 安装完成实物图



6 仿真与调试

6.1 工作演示

示波器的工作状态演示如图6.1所示。输入为 10kHz, $\pm 3V$ 的正弦波，可以看出示波器垂直和水平精度俱佳，波形无失真。更详细的功能演示参考演示视频。

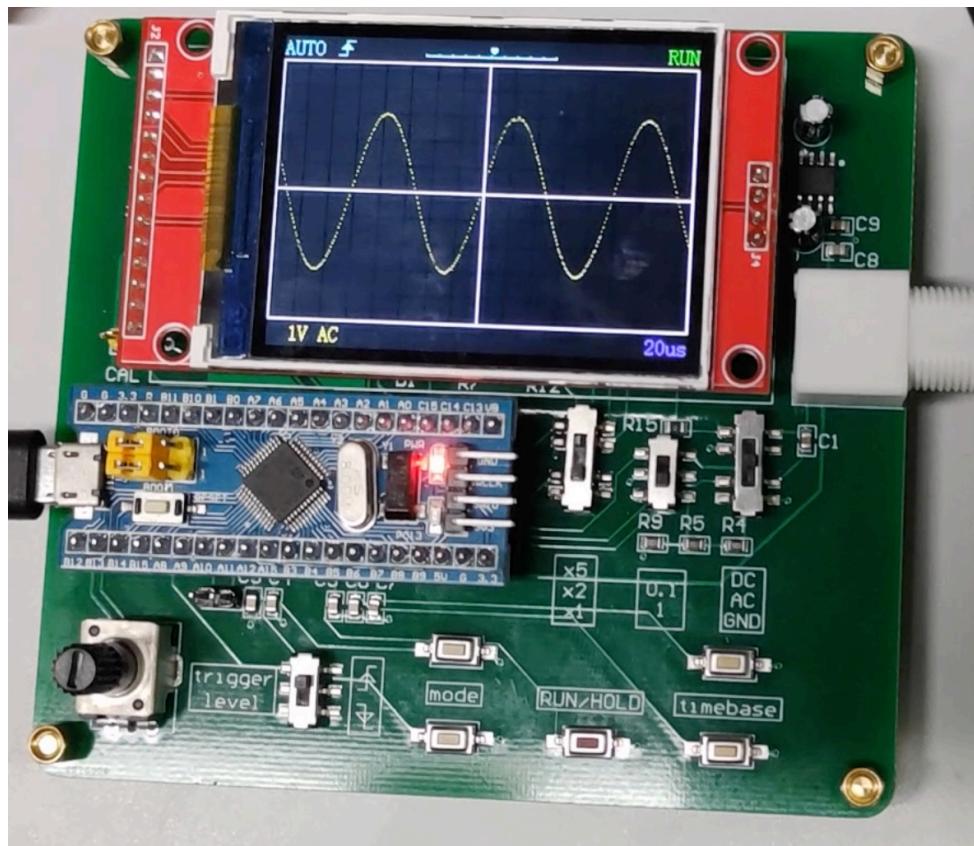


图 6.1 示波器工作状态演示

6.2 遇到的问题及解决方法

6.2.1 静态工作点不为 0

此问题是在测试板¹上发现和解决的。

在实际电路调试中，发现第一级运算放大电路的静态工作点（即 0 输入时）不为 0。如图6.2所示，通过测量了四个不同档位下，不同点的电压值，经过计算，猜测和验证，

¹在制作最终产品之前，我们首先做了一块测试板用于测试信号调理电路

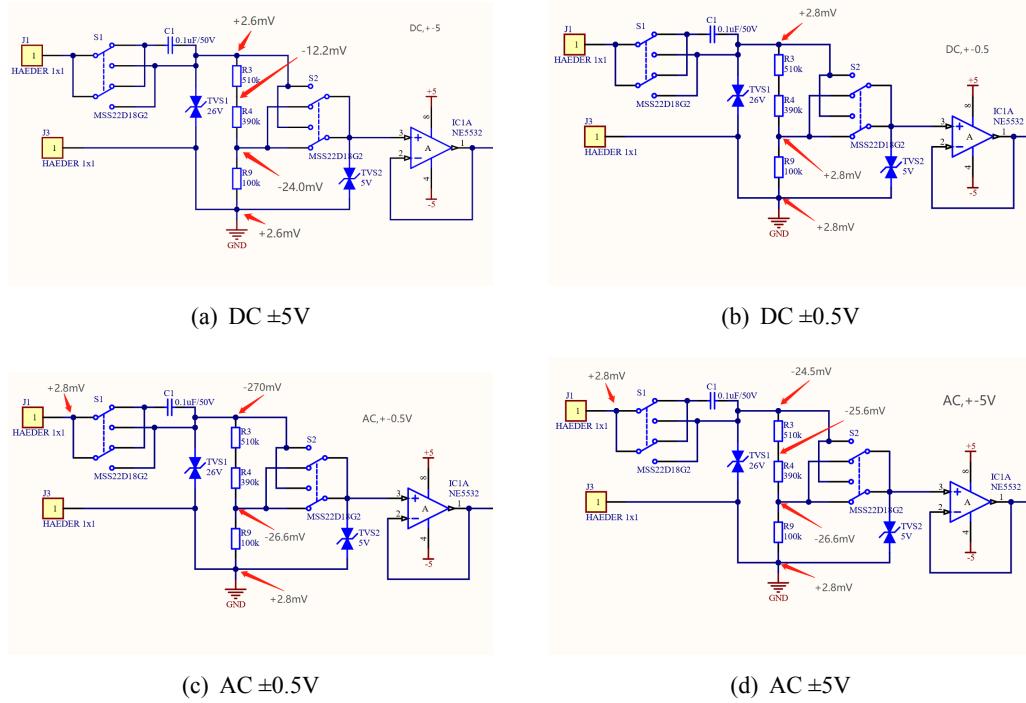


图 6.2 四个不同档位下不同点的电压值

发现是由于 NE5532 的输入偏置电流所导致的。解决方法是更换为输入偏置电流极小的 TL072。

6.2.2 TVS 导致的信号衰减

此问题也是在测试板上发现和解决的。

如图6.3所示，第一级运算放大电路的输入端加 TVS 管² 保护电路时，x0.1 衰减档的频率特性受到严重影响。推测原因很可能是分压电阻与 TVS 的结电容构成了低通滤波器。根据 datasheet，TVS 管的结电容大约为 1000pF。它和 900kΩ 的电阻构成了一个低通滤波器，上限截止频率约为

$$f_H \approx \frac{1}{2\pi \times 900k \times 1n} = 177Hz \quad (6.1)$$

从而导致了高频信号的严重衰减。解决方法是直接放弃了 TVS 管保护电路。

²TVS 二极管，即瞬态电压抑制二极管 (Transient Voltage Suppression Diode)，可保护电子器件免受导线引入的电压尖峰的影响。

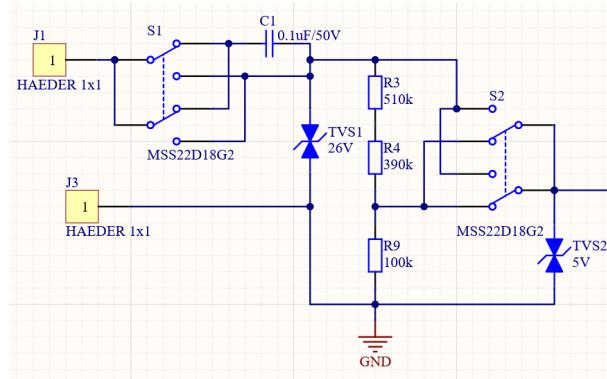


图 6.3 TVS 管保护电路

6.2.3 MODE 按钮异常

此问题是在成品上发现和解决的。如图6.4所示，由于设计时的疏忽，mode+ 和 mode-按钮所接的 GPIO 在核心板上还连接了 USB 接口的 D+ 和 D-，于是在连接 USB 线时，这两个按钮不能正常工作。

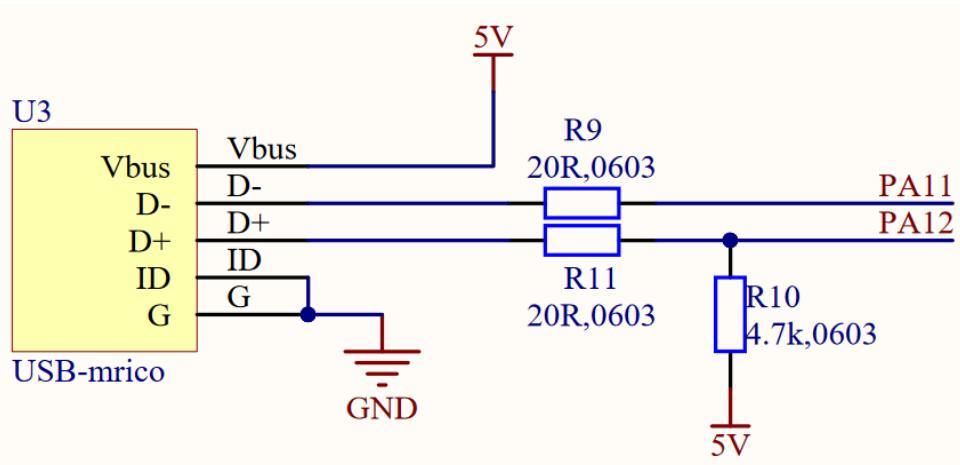


图 6.4 PA11 和 PA12 引脚和 USB 接口的连接情况

临时解决方法是，剪断了供电所用 USB 线里的 D+ 和 D-引脚，用改造过的 USB 线供电，按钮就可以正常工作。



7 总结

本项目基于 STM32F103C6T6，设计了具有轻便、低功耗、适中性能、低成本等特点的数字示波器。其中，输入信号调理电路实现了将不同范围的外部输入，映射到 STM32 的 ADC 输入范围内的功能，且具有极高的带宽和精度。负压转换电路负责向运放提供负电源，在保证供电能力的条件下，尽可能简化了设计。软件部分实现了丰富的模式和功能，且性能出色、稳定性好，UI 设计简洁易用，满足了使用需求。示波器设计精巧，在简单的测量场合下完全足以胜任，具有较高的学习和实用价值。



参考文献

- [1] Texas Instruments. LMx24, LMx24x, LMx24xx, LM2902, LM2902x, LM2902xx, LM2902xxx Quadruple Operational Amplifiers datasheet (Rev. W)[EB/OL]. <https://www.ti.com.cn/lit/gpn/lm324>.
- [2] 清华大学电子学教研组. 模拟电子技术基础[M]. 第五版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [3] Texas Instruments. NE5532x, SA5532x Dual Low-Noise Operational Amplifiers datasheet (Rev. J)[EB/OL]. <https://www.ti.com.cn/lit/gpn/ne5532>.
- [4] Texas Instruments. TL07xx Low-Noise FET-Input Operational Amplifiers datasheet (Rev. S) [EB/OL]. <https://www.ti.com.cn/lit/gpn/tl072>.
- [5] Diodes Incorporated. ZMM3V3 datasheet[EB/OL]. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/59354/DIODES/ZMM3V3.html>.
- [6] NXP Semiconductors. 1N4148 datasheet[EB/OL]. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/15021/PHILIPS/1N4148.html>.
- [7] Intersil Corporation. ICL7660 datasheet[EB/OL]. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/541067/INTERSIL/ICL7660.html>.
- [8] ST Microelectronics Corporation. STM32F103X4 STM32F103X6 Datasheet[EB/OL]. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c6.pdf>.
- [9] ILI Technology Corp. ILI9341 Specification Preliminary[EB/OL]. <https://www.alldatasheetcn.com/datasheet-pdf/pdf/1131760/ETC2/ILI9341.html>.