

浙江大学



本科实验报告

姓名：

学院： 生物医学工程与仪器科学学院

系： 生物医学工程

专业： 生物医学工程

学号：

指导教师： 叶学松

2025 年 4 月 17 日

浙江大学实验报告

课程名称： 电子系统设计与实践

实验项目名称： 记忆示波器系统设计

指导老师： 叶学松

实验地点： 教7西裙楼 - 301 实验日期： 2025 年 4 月 20 日

一、实验目的和要求

1. 实验目的

- 1) 掌握简单系统的焊接，调试；
- 2) 学会使用单片机进行数据处理；
- 3) 培养一定的仪器设计与实践能力。

2. 实验要求

设计一款具备记忆功能的数字示波器，要求如下：

- 1) 设计前：分析输入、输出波形的频率，结合系统资源及设计要求，选择适合的系统主频以及 ADC 采样频率；
- 2) 设计完成后：记录、分析输入、输出波形数据的幅值变化特点及相位变化特点、频率变化特点，讨论其成因及可能的改进方法；
- 3) 验收：提供能够证明预期设计要求的信号，如定时器提供的时间基准、采样频率、输出波形频率、显示刷新频率、显示数据更新频率等。

二、实验内容和原理（必填）

1. 实验内容

- 1) 查找、阅读相关资料，完成实验系统的焊接、调试；
- 2) 利用实验系统的 ADC 接口，对一路模拟输入信号进行采样、存储，并可

经 DAC 输出；

3) 系统工作模式可以通过按键设置，至少包括下列几种模式：

- i. 波形实时显示模式：模拟输入信号经 ADC 采样后，同时进行存储(6264)和经 DAC (0832 中的一路) 输出，另一路 DAC 作为信号发生器，输出一个固定频率的周期信号，周期信号的波形可以用按键选择如下四种之一：正弦波、三角波、方波、锯齿波；
 - ii. 波形回放显示模式：模拟输入信号经 ADC 采样后，经 DAC 输出（不进行存储）；原作为信号发生器输出的 DAC，将记录在 6264 中的波形数据转换为模拟输出；（回放的波形在波形的频率和幅值上与实时显示时的波形应该一致）
 - iii. 测量模式：将 ADC 输入的模拟信号的当前幅值、频率（或周期）等信息显示在数码管上；显示数据更新速率不小于 4HZ（每秒 4 次）；
 - iv. 通过 LED 或数码管显示当前工作模式；
 - v. 可选功能：作为信号发生器的 DAC 输出的幅值、频率（周期）分档可调（不少于 4 档）；
- 4) 分析输入、输出波形的频率，选择合适的 ADC 采样频率；记录、分析输入、输出波形数据的幅值变化特点及相位变化特点、频率变化特点，讨论其成因及可能的改进方法。

2. 实验原理

STC12C5201AD 系列带 A/D 转换的单片机的 A/D 转换口在 P1 口(P1.7-P1.0)，有 8 路 8 位高速 A/D 转换器，速度可达到 300KHz（30 万次/秒）。8 路电压输入型 A/D, 可做温度检测、电池电压检测、按键扫描、频谱检测等。上电复位后 P1 口为弱上拉型 I/O 口，用户可以通过软件设置将 8 路中的任何一路设为 A/D 转换，不需作为 A/D 使用的口可继续作为 I/O 口使用。需作为 A/D 使用的口需先将 P1ASF 特殊功能寄存器中的相应位置为‘1’，将相应的口设置为模拟功能。

将 A/D 转换器采样频率设定在某值，并在外存储器内部 6264 中设置一较大的缓冲区用作数据存储。缓冲区长度可以根据采样率与希望保存的数据时间长度计算，如采样率为 200Hz，希望存储 2 分钟的数据量，则缓冲区的长度为： $200 \times 60 \times 2$ 。系统有二路 D/A，一路由程序发生时基信号控制示波器外扫描输入

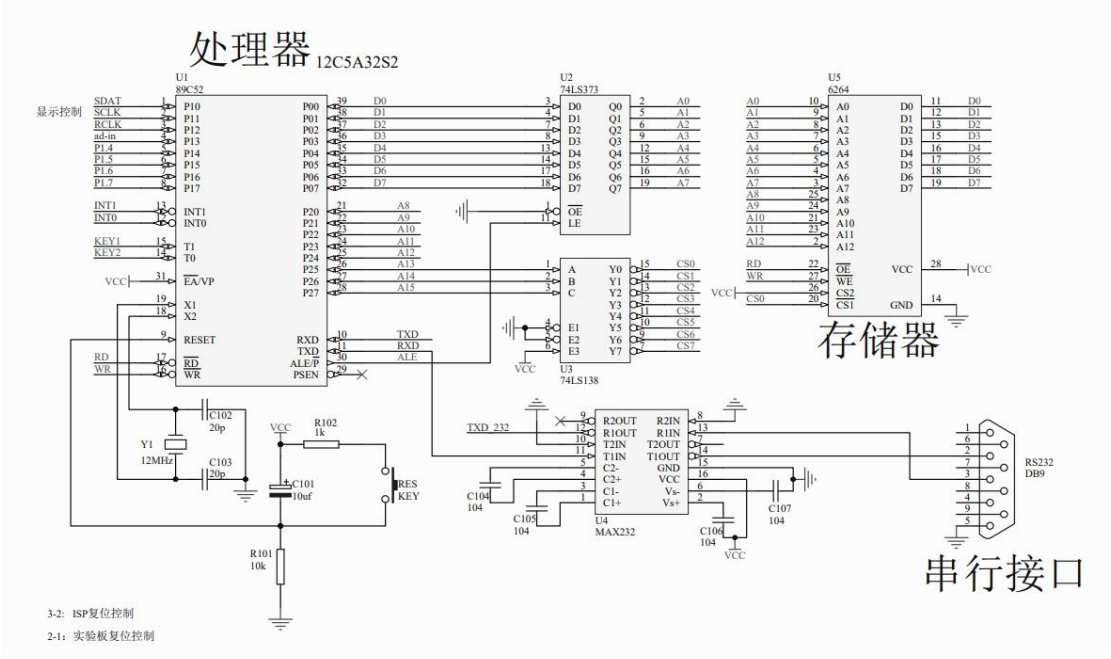
(x 输入端)；另一路输出 D/A 缓冲区的数据。二路 D/A 同步则可以实现示波器数字化控制。

三、主要仪器设备

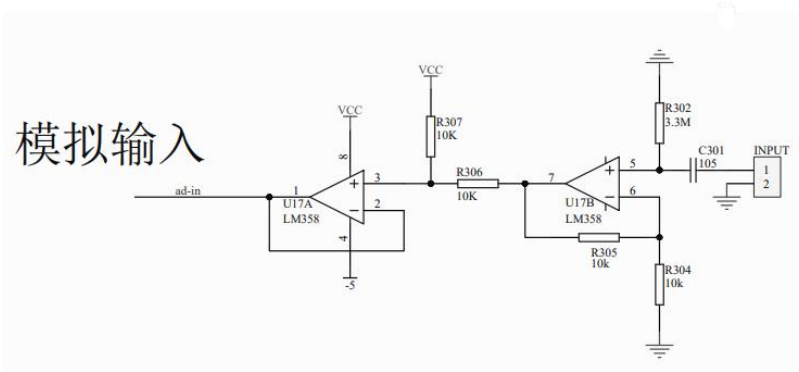
稳压电源，信号发生器，万用表，示波器，烙铁、镊子、尖嘴钳、螺丝刀、记忆数字示波器实验板，电脑等。

四、硬件电路

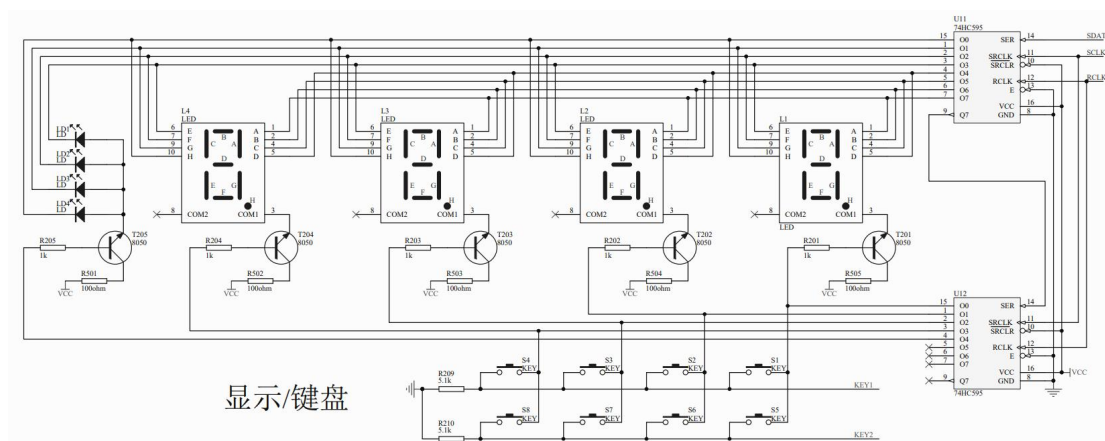
本实验的电路原理图如下：



处理器存储器以及烧录电路

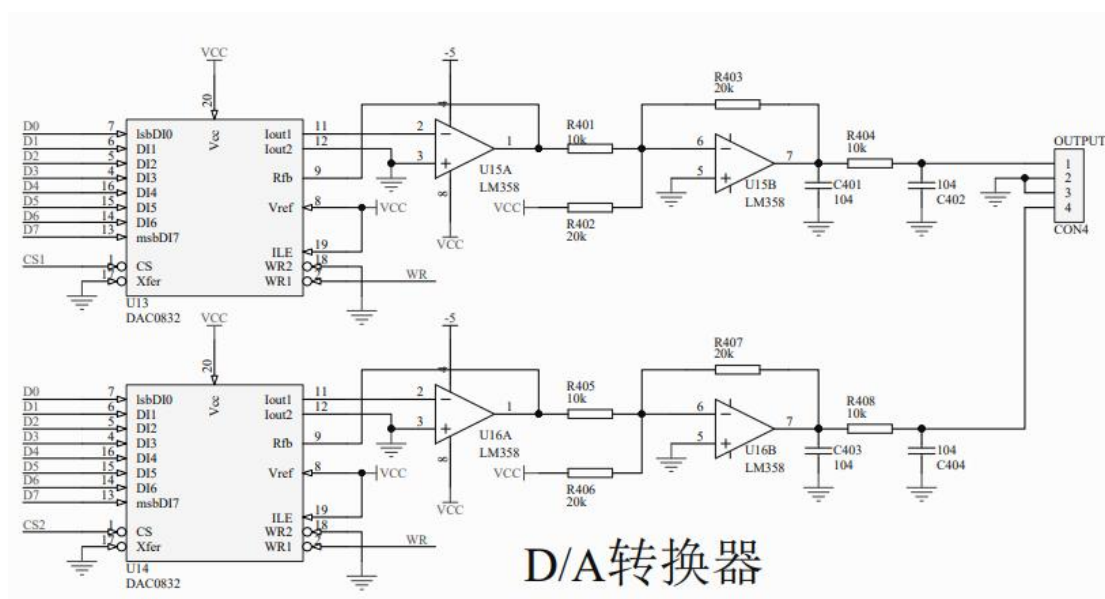


模拟输入电路



显示/键盘

显示及键盘扫描电路

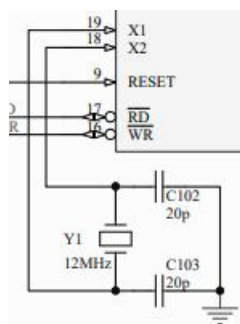


D/A转换器

模拟输出电路

(一) 核心处理器模块

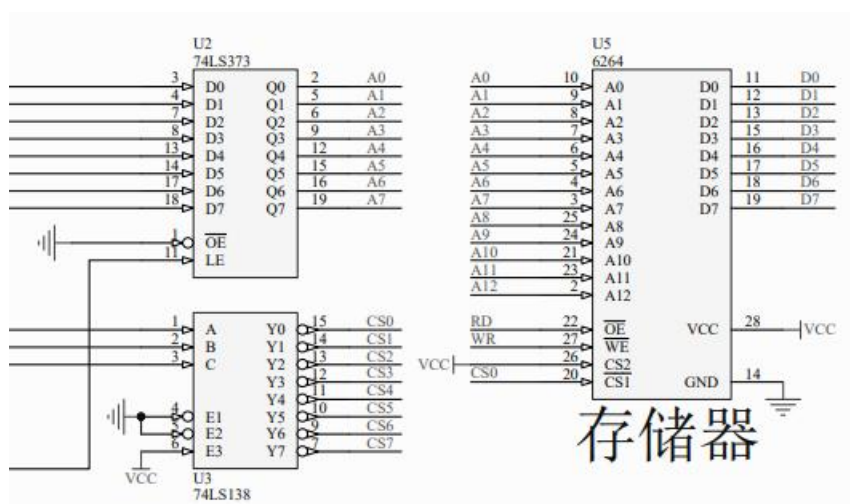
本电路的主要处理器使用的是 STC12C5A60S2 芯片（DIP40 封装），相比普通的 80C51 单片机，本芯片的主要特点是内部集成 8 路 8 位高速 ADC，同时芯片内部有 32KB 的程序存储器(ROM)供烧录程序。芯片位数为 8 位，片内 120B RAM，四个 8 位并行 I/O 接口 P0 ~ P3，每个口既可以作为输入也可以作为输出。两个定时器，每个定时器可以设置成计数方式，对外部事件进行计数，也可以设置成定时方式，并可以根据计数或定时的结果实现计算机控制。五个中断源的中断控制系统。由电容及开关构成复位电路。片内振荡器和时钟产生电路，但石英晶体和微调电容需要外接。12C5A60S2 可以使用 24MHz 的频率作为时钟，相比较传统的 51 单片机在速度上有较大的提升。



外部时钟源

本电路利用晶振以及电容提供电路的外部时钟源，由于需要进行数字示波，需要使用定时器中断来定间隔检测电压，而中断时长应为整数，由于定时器的定时为时钟的 12 分频，所以利用 12MHz 为定时器提供稳定整数中断计时时长。

(二) 数据存储模块

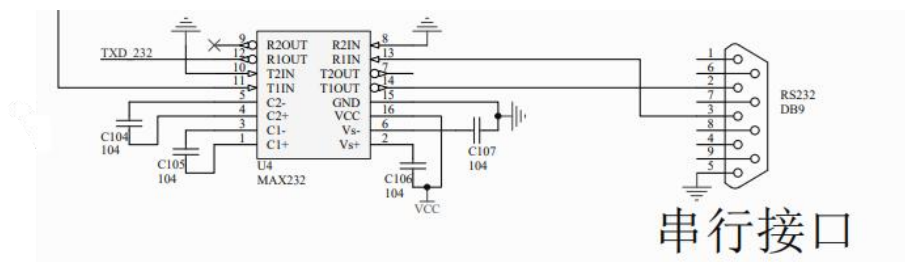


外部存储器

扩展 6264 芯片（8KB SRAM）作为波形数据缓冲区，首先是使用了 74LS373 来实现 P0 口地址线与数据线的分时复用。在调用 MOVX 指令的时候，芯片 ALE 口会自动改变电平，控制 74LS373 的锁存情况，先将 P0 口的地址信息锁存，然后再将数据传回 P0 口，整个过程由 74LS373 存储 P0 提供的地址。

另外利用了 74LS138 三八译码器来调整外扩器件的地址，通过对 P2 口高 3 位（P2.5-P2.7）译码，从而根据 16 位地址选择需要的器件（RAM 或 DAC）。实验中使用的输出口位 0、1、2，对应输入为 000、001、010。对于整个 16 位地址来说，这三个器件对应的地址为 0x0000-0x1FFF、0x2000-0x3FFF、0x4000-0x5FFF。

(三) 烧录模块



烧录部分电路

实验提供了两种烧录的方法，其中之一就是像如上电路那样使用 MAX232。这一芯片用到了 RS232 串口：



引脚	简写	功能说明
1	CD	载波侦测 (Carrier Detect)
2	RXD	接收数据 (Receive)
3	TXD	发送数据 (Transmit)
4	DTR	数据终端准备 (Data Terminal Ready)
5	GND	地线 (Ground)
6	DSR	数据准备好 (Data Set Ready)
7	RTS	请求发送 (Request To Send)
8	CTS	清除发送 (Clear To Send)
9	RI	振铃指示 (Ring Indicator)

RS-232 是常见的串行通信标准，其标准的“1”电平在 $-5\sim-15\text{V}$ 之间，“0”电平在 $+5\sim+15\text{V}$ 之间，而单片机等数字逻辑电路通常使用 TTL 电平（+5V 表示 1，0V 表示 0），两者电平标准不同，因此需要 MAX232 将 RS-232 串行接口信号转换为适合 TTL 兼容数字逻辑电路使用的信号。

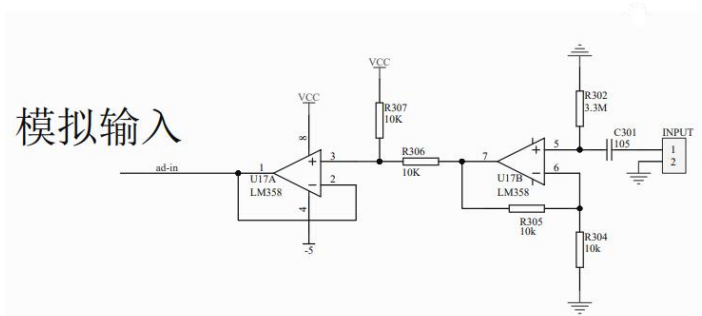
MAX232 芯片内部包含一个电荷泵 (charge pump) 和外部电容器，能够从单一的 5V 电源产生 RS-232 所需的电压(大约 $\pm 7.5\text{V}$)，从而实现 TTL 电平与 RS-232 电平之间的转换。该芯片具有两个驱动器和两个接收器，可以转换 RX、TX、CTS、RTS 等信号。驱动器将 TTL 电平转换为 RS-232 电平，接收器则将 RS-232 电平转换为 TTL 电平。

在实际应用中，单片机的 P3 口复用为 RXD 和 TXD 接口，用于串行通信。通

过在单片机与上位机的 RS-232 口之间接入 MAX232 芯片,可以实现两者之间的电平转换,从而实现有效的通信。例如,单片机的 RXD(接收数据)和 TXD(发送数据)引脚分别连接到 MAX232 的接收器和驱动器,而 MAX232 的输出则连接到电脑的 TXD 和 RXD 引脚,同时确保地线相连。这样,单片机与电脑就可以通过 RS-232 接口进行全双工通信。

本次实验未采用这种烧录方式实际采用 ISP 下载方式,通过单片机 P3 口直接连接电脑实现程序更新。

(四) 模拟输入电路

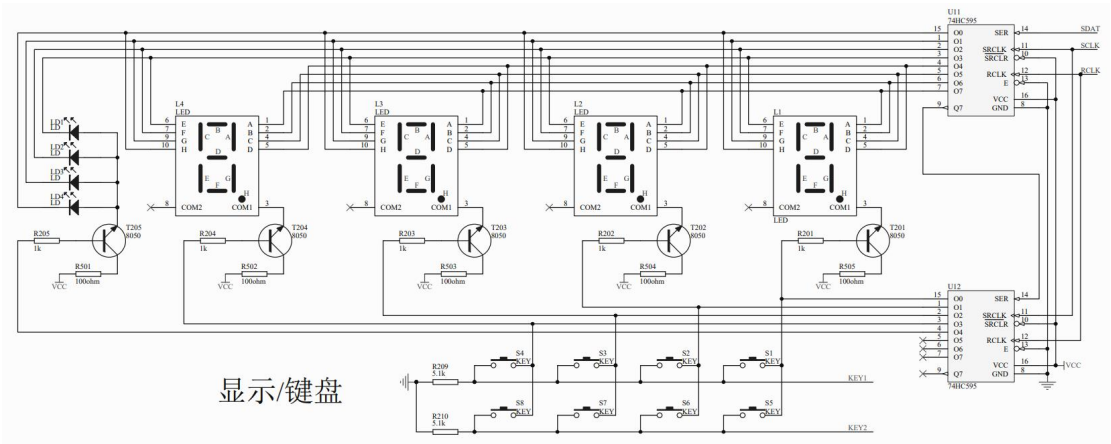


模拟输入电路

输入信号经 RC 高通滤波器 (R302、C301) 去除直流偏置,通过 LM358 运算放大器构成的同相比例放大电路提升信号幅值,最后利用电压跟随器做阻抗变换,确保 ADC 输入阻抗匹配。

实际的 AD 部分在单片机内部操作,即选用 P1.3 作为模拟输入通道,通过设置 P1ASF 寄存器使能 ADC 功能,输入信号范围 0-5V,经内部 8 位 ADC 转换为数字量。

(五) 显示与键盘扫描电路



显示及键盘扫描电路

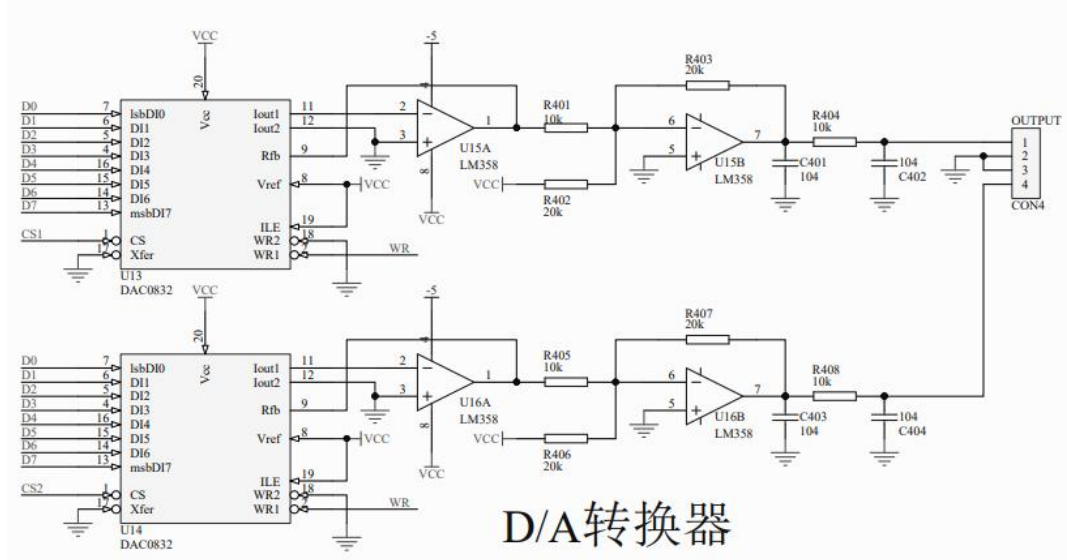
由于外扩了 ROM 和 DAC 芯片，所以需要利用**串行 + 扫描**的方式来显示，并且在扫描显示的同时利用扫描检测键盘输入。

实验中使用两片 74HC595 串并转换芯片驱动 8 位共阴极数码管，低 8 位输出段码，高 5 位扫描位码。在 SCLK 的控制下从 SDAT 串行输入数据，在完成输入后利用 RCLK 控制，将输入的串行数据一次性并行输出。

两片芯片的级联可以完成 16 位串行数据转并行输出。其中低八位控制 LED 的亮暗，将共阴极数码管的编码输出至低八位即可。高八位负责随时间进行扫描操作，同一时间只有一位为高位（否则会使两个 LED 同时亮起相同的数字或键盘输入出错）实际操作使用了高八位中的低 5 位。通过扫描配合低 8 位完成显示。同时扫描线也完成对键盘的扫描检测，将键盘接入单片机的端口，根据端口电位以及扫描情况可以确定按键。

按键检测方面，采用矩阵键盘扫描方式，按键输入与数码管扫描复用 I/O 口，通过检测端口电平变化识别按键动作，支持模式切换（实时显示、回放、测量）、波形选择（正弦 / 三角 / 方波 / 锯齿波）及参数调节（幅值 / 频率分档）。

（六）模拟输出电路



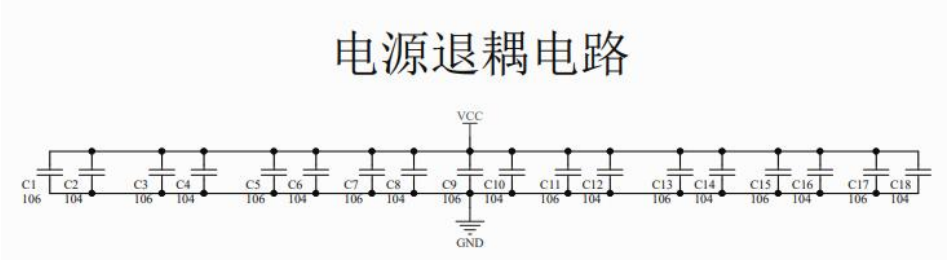
模拟输出电路

采用两片 DAC0832（8 位电流型 DAC），分别用于波形回放（CH1）和信号发生器（CH2），且 DAC 电路芯片的连接与 RAM 相同，利用了 74LS373 和 74LS138 完成地址线锁存及地址线编码（CH1: 0x2000, CH2: 0x4000），输出电流经 LM358

转换为电压信号，外接 RC 低通滤波器平滑波形。

在软件中，就可以利用 MOVX 直接完成 DA 操作，需要注意的是 DA 芯片在转换时要求 WR 端的下拉时间足够长，而默认状态下处理器 MOVX 指令输出的下拉时长不足，需要在软件中进行调整及设置。在输出端利用放大器输出电压，然后输入另一个放大器调节电压，最后接低通滤波器并输出。

(七) 电源与接口电路



电源退耦电路

在电源端并联 104 μ F（高频滤波）和 106 μ F（低频滤波）电容，抑制电源噪声，确保模拟电路与数字电路稳定供电。

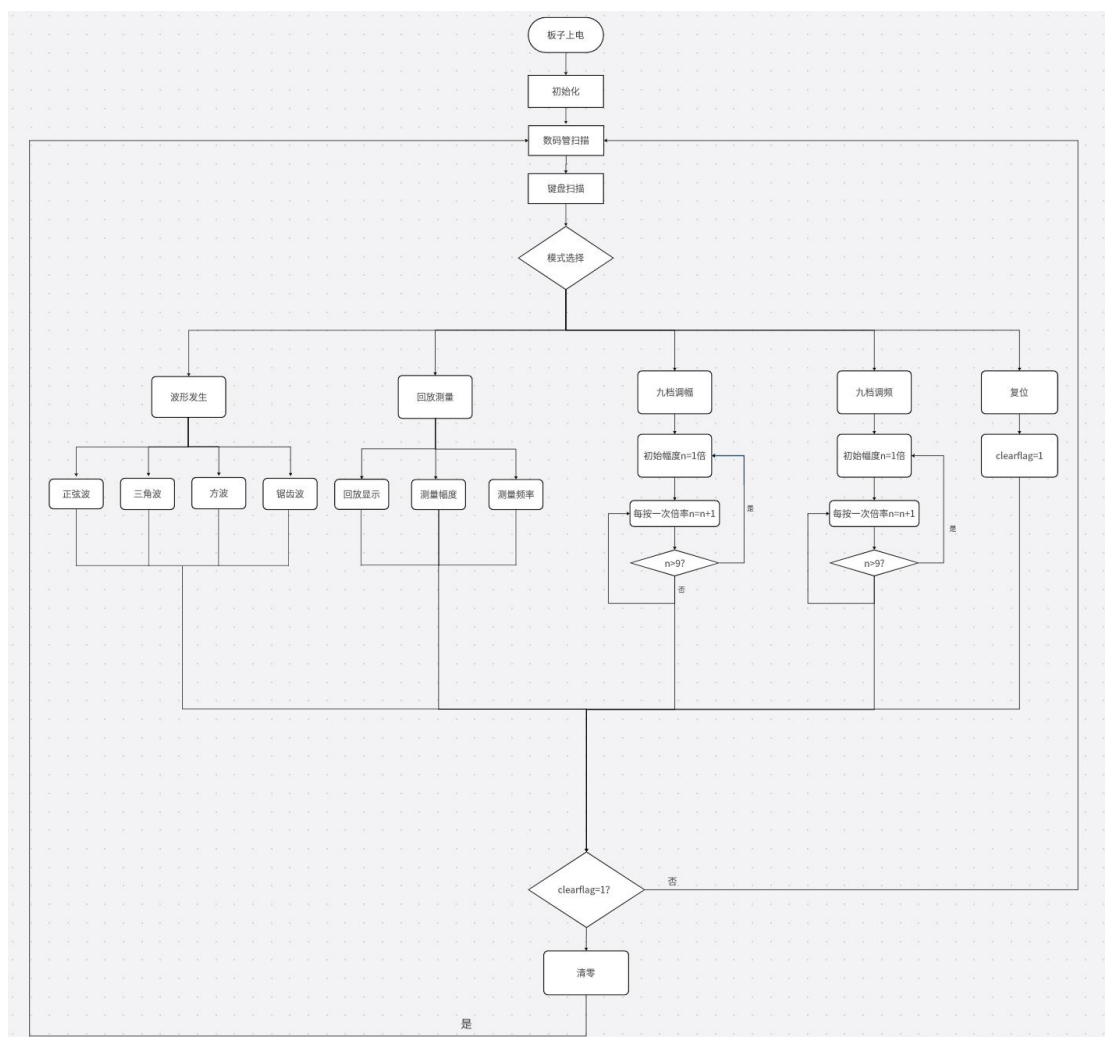
硬件电路所需的器件表如下：

器件	型号	数量
贴片电阻	1K	6
	10K	9
	100 Ω	5
	3.3M	1
	5.1K	2
	20K	4
贴片电容	104	17
	106	9
IC 插座	DIP28	1
	DIP40	2
	DIP20	3
	DIP16	4
	DIP8	3

DB9 公头弯座		1
20p RAD0.1 20p	瓷片电容 20p	2
105 独石 RAD0.1	独石 RAD0.1	1
10uF	电解电容 50V/10uF	3
47uF	电解电容 25V/47uF	1
100uF	电解电容 16V/100uF	2
12MHz/11.0592MHz	XTAL1	1
发光 LED	SIP2	4
12C5A32S2	DIP40	1
MAX232	DIP16	1
DAC0832	DIP20	2
74HC595	DIP16	2
74LS373	DIP20	1
74LS138	DIP16	1
LM358	DIP8	3
实验板	5×7cm 全洞洞单面板	1

五、软件设计与实现

软件基于 Keil C51 开发环境,采用模块化设计思想,围绕 STC12C5A60S2 单片机实现记忆示波器的核心功能功能:



软件系统划分为系统初始化、数据采集与存储、波形生成、人机交互、中断处理、参数测量六大模块，各模块通过状态机机制与全局数据缓冲区实现协同工作，支持实时采样、波形回放、参数调节及多模式测量。

（一）系统初始化模块

在主函数里，程序会先执行一些预操作，包括 CPU 晶振降频、打开 A/D 转换电源、调用初始化中断函数等。当进入中断时，会进行 A/D 采样，保存输出的操作。

1、定时器初始化

定时器 0 配置为 8 位自动重装模式（TMOD=0x02），初值设为 0x06，产生 250 μ s 定时周期，用于驱动 ADC 采样与波形生成中断（ET0=1，TR0=1）。

2、ADC 初始化

使能 P1.3 作为模拟输入通道（P1ASF=0x08），设置 ADC 工作参数

(ADC_CONTR=0xE3)，采用 90 个时钟周期转换时间，支持 8 位精度转换 (AUXR1=0xFB)，系统时钟分频为 12MHz/1=12MHz。

3、中断初始化

(1) 高优先级中断 (定时器 0)

每 250 μ s 触发一次，执行 AD 采样 (get_adc())、数据存储 (save_adc())、波形生成 (waveGenerate()) 及实时 DA 输出 (disp_da(0))，确保采样与输出的同步性。

当处于回放模式 (mod[0]=2) 时，切换 DA 输出为缓冲区数据 (disp_da(1))，通过 play_p 指针循环读取历史数据。

(2) 低优先级中断 (定时器 1)

启用但未实现功能模块。

其最初目的为，解决频率测量上限过低的问题。这是一个软硬件协同调试的过程，在最开始，PI⁴ 的翻转频率仅在切换到测量模式 (mod[0]=2) 时会从 900 降到 200Hz 左右——一开始，我们认为这就是为什么频率测量上限不超过 200Hz 的核心原因，因为采样频率跟不上实际频率。但是调试软件解决这个问题之后，频率测量的上限并没有提高。

为此，我们开始审视是否是因为主循环与中断的执行过程中存在过于耗时的代码片段：毕竟参考定时器 0 的功能实现，这完全不是空穴来风。因此我们设置定时器 1 来尝试 debug 问题，但最终没有成功解决。本着软件敏捷开发的鲁棒性，我们将项目回退为这个功能更为齐全的版本，因此保留了未实现任何功能的定时器 1 中断。

4、全局状态初始化

初始化显示缓冲区 disp_buf 为全灭状态，按键标志 key_flag、采样指针 dp、回放指针 play_p 等关键变量复位。

同时正弦波查找表 sin_tab 预先生成 100 个点的 8 位正弦数据，用于波形生成时的快速查表。

(二) 人机交互模块

1、LED 数码管动态显示

初始化之后，主函数会进入循环，一直检测是否有按键按下的信息，如果有

则改变相应的变量，具体功能在数码管扫描函数 `void scan_disp ()` 中实现，支持显示波形类型、模式参数 (`mod [0]/mod [1]`) 及测量结果 (幅值、频率)。

实现数码管扫描所需的 74HC595 是一个串行转并行的芯片。执行程序时，先将片选码按位存入，然后对同一个 74HC595 按位输入数字码，此时片选码将会被压入第二个 74HC595。完成之后，通过对输出开关施加一个脉冲，使得两个芯片同时输出，此时便会在相应的数码管显示相应的数字。

2、矩形按键处理

按键扫描使用 **状态机** 方式实现，采用行列扫描法 (`KEY1/KEY2` 对应 `P3^4/P3^5`)，通过 `scan_key()` 函数检测按键动作，支持模式切换 (功能键) 与参数调节 (参数键)，按键消抖通过状态机实现 (`key_state` 记录按下 / 释放状态)。

`mod[0]` 表示功能模式 (1-波形发生, 2-回放测量, 3-调频, 4-调幅)，`mod[1]` 表示当前参数档位 (1-9 档)，通过 `mode_switch()` 函数实现模式逻辑切换。

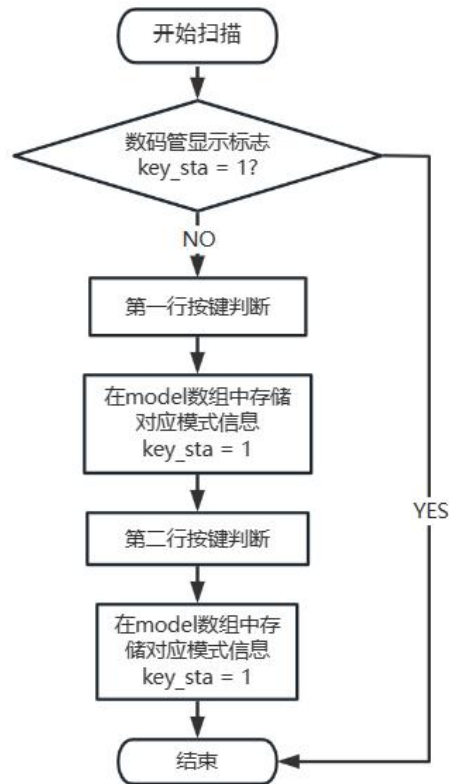
按下键盘 1，进入 **波形选择** 模式，再通过键盘第二行按键选择波形形状，CH1 实时显示输入波形，CH2 显示发生波形。

按下键盘 2，进入 **回放测量** 模式，再通过第二行按键选择回放模式、频率测量模式和幅值测量模式。选择回放模式时 CH1 回放采样波形，CH2 输出生成的波形。选择频率测量模式时，数码管显示对应输入波形的频率值；选择幅值测量模式时，数码管显示对应输入波形的幅值，CH1 实时显示输入波形，CH2 显示发生波形。

按下按键 3，进入 **频率调节** 模式，再通过键盘第二行按键选择波形频率的九个不同档位，档位越高频率越高，每按一下档位增加一，增加到第九档时再次按下会重置回第一档。CH1 实时显示输入波形，CH2 显示发生波形。

按下按键 4，进入 **幅度调节** 模式，再通过键盘第二行按键选择波形幅度的四个不同档位，档位越高频率越高，每按一下档位增加一，增加到第九档时再次按下会重置回第一档。CH1 实时显示输入波形，CH2 显示发生波形。

按下按键 5，系统复位。

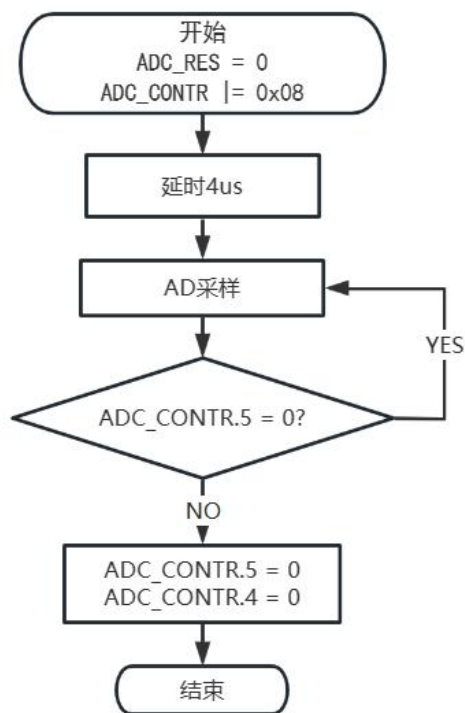


按键扫描流程图

(三) 数据采集与存储模块

1、A/D 采样功能

定时器 0 中断触发 get_adc() 函数，通过 ADC 控制寄存器启动转换，采用轮询方式等待转换完成（标志位 ADC_CONTR&0x10），单次采样耗时约 $1\mu\text{s}$ ，配合 $250\mu\text{s}$ 定时周期实现 4kHz 实时采样率。



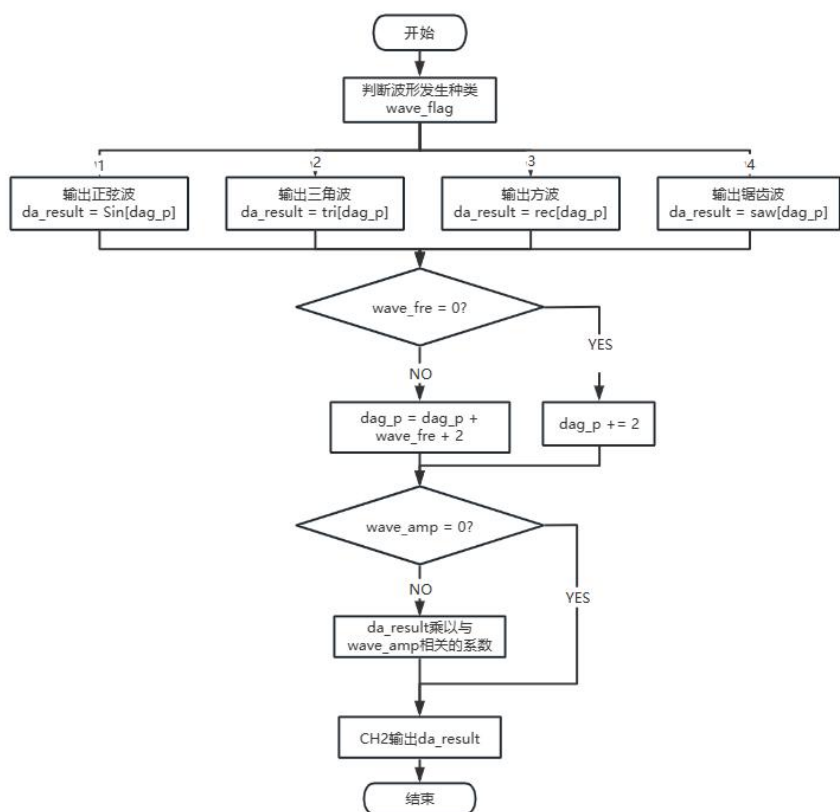
A/D 转换流程图

采样数据存储于 2KB 外部 RAM 缓冲区 `data_buf`，采用**环形**队列结构（**指针 dp 循环覆盖**），支持最长 3.5s 的波形数据存储（缓冲区大小 `DA_LEN=7000`）。

2、DA 输出驱动

实时采样数据通过 `DA_CH1` 输出（`DA_CH1=adc_val/2`），回放数据通过 `DA_CH2` 输出（`DA_CH2=data_buf[play_p]/2`），实现双路模拟信号输出，支持实时波形与历史波形对比显示。

（四）波形生成模块



波形发生流程图

波形发生功能主要依靠波形发生函数 void waveGenerate(int wave, int amp, int fre)实现，支持正弦波、方波、三角波、锯齿波四种基本波形，通过 wave_type 状态变量切换（0 - 默认，1 - 正弦，2 - 方波，3 - 三角，4 - 锯齿）。

函数中使用了三个变量 wave、amp、fre 来控制发生信号的波形形状、幅值和频率，实现了四种不同波形的输出，并结合按键 3 的调幅调频功能来调整输出的波形效果。

1、参数调节算法

(1) 调幅 (AM)：以基线值 128 为中心，通过档位参数 w_amp (1-9 档) 调整波形幅度，计算公式为：

$$da_result = 128 + (\text{原始值} - 128) \times w_amp / 4$$

(限制输出范围 0-255 避免硬件损坏)

(2) 调频 (FM)：通过 w_freq 参数调整波形生成步进 (1-9 档对应步进 +1 至 +9)，实现频率 0.5Hz-10Hz 可调 (基于 GEN_LEN=200 点的周期计算)。

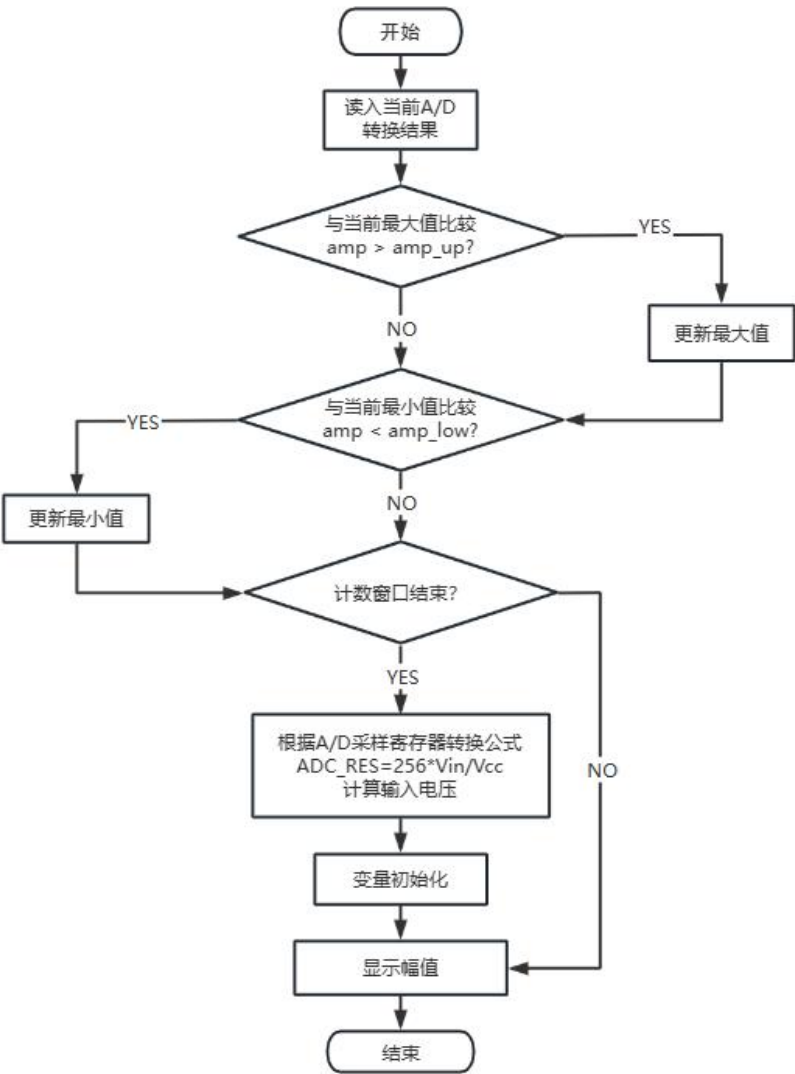
2、查表法优化

正弦波生成采用预计算的 sin_tab 查找表，通过指针 g_p 循环遍历，避免实时计算三角函数的高耗时问题，提升波形生成效率。

(五) 参数测量模块

1、幅值测量

幅值测量采取**极值检测算法**，其基本思想是，遍历 AD 采样数据(AD_LEN=500 点)，记录最大值 up_amp 与最小值 low_amp，根据 ADC 转换公式计算输入电压幅值：

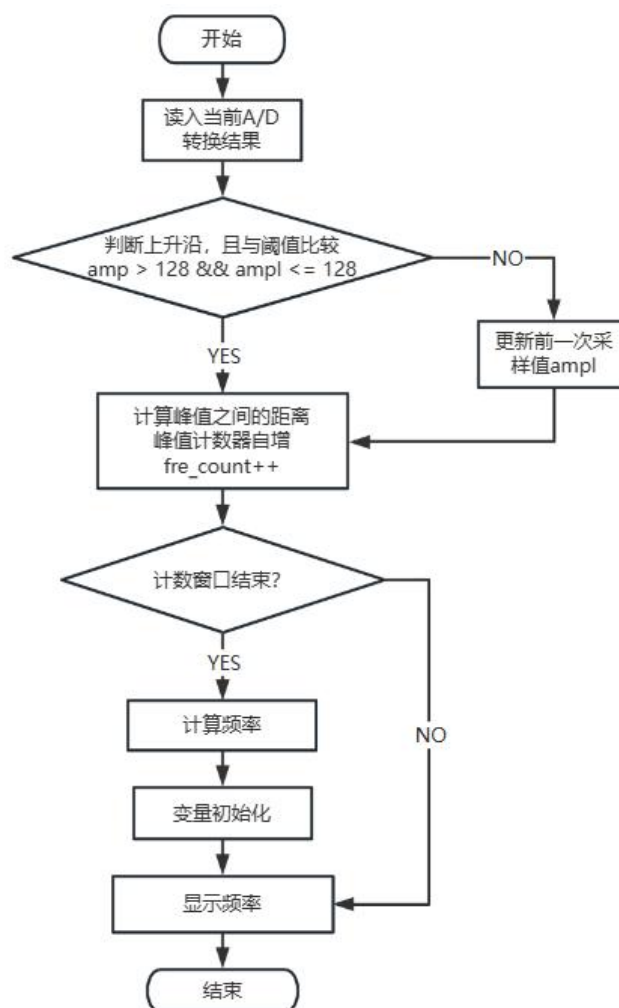


幅值测量流程图

每完成一次 500 点采样后重置极值变量，避免历史数据干扰，测量结果实时显示于数码管。

2、频率测量

这里采用**过零检测法**，通过检测波形上升沿过基准电压（128，对应 2.5V）的位置，计算相邻两个峰值的时间差换算频率。由于波形较为理想，因此设定 128，即对应原始波形的 0 为阈值，使用 amp 获取 A/D 采样数据，amp1 存储前一个 A/D 采样值，只有 amp 大于 128，且 amp1 小于 128 才使得频率计数器自增，因此只有波形上升沿过阈值才计数一次。

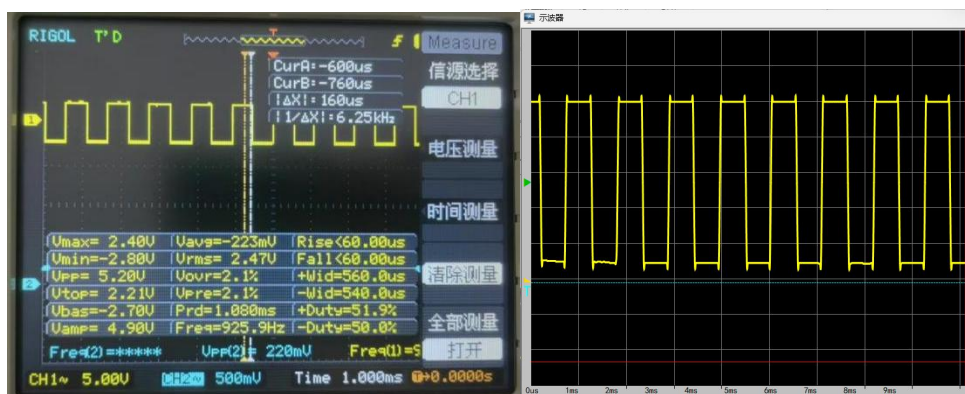


频率测量流程图

六、实验结果与分析

1、基本参数总结

- 采样率：1851.8Hz



示波器和口袋实验室的采样频率

测量得到的频率为 925.9Hz 左右，注意是 $Y = !Y$ 翻转频率需要乘 2，故采样频率为 1851.8Hz。

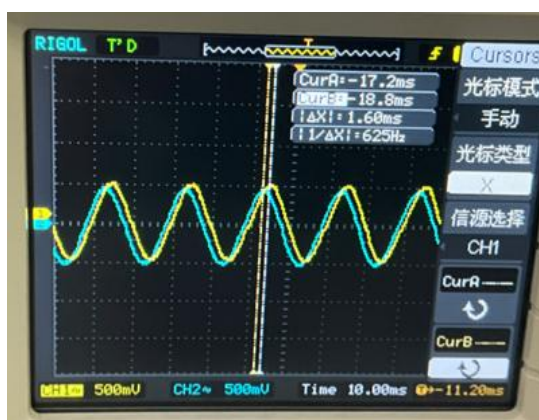
因为我们采用的晶振不是 12MHz 而是 11.0592MHz，所以代码的采样频率理论上是晶振频率 / (12/2 × (256 - 定时器初值)) = 11.0592M / (12/2 × 250) = 1843.2Hz，与实际测量结果近乎一致。

- 记录时长：3.5s

由于外部存储最大能存储 8KB 数据，考虑到一部分需要用来储存表格用以查询，因此我们设置了储存信号数组长度 DA_LEN 为 7000，故能够储存 7000/2k=3.5 秒的波形，且设置为了循环保存。

- 测量幅度范围：0-2.40V
- 测量频率范围：6-203Hz
- 系统延迟时间：50Hz 下 $\Delta t = 1.6ms$

关于系统延迟时间，测得结果如下：

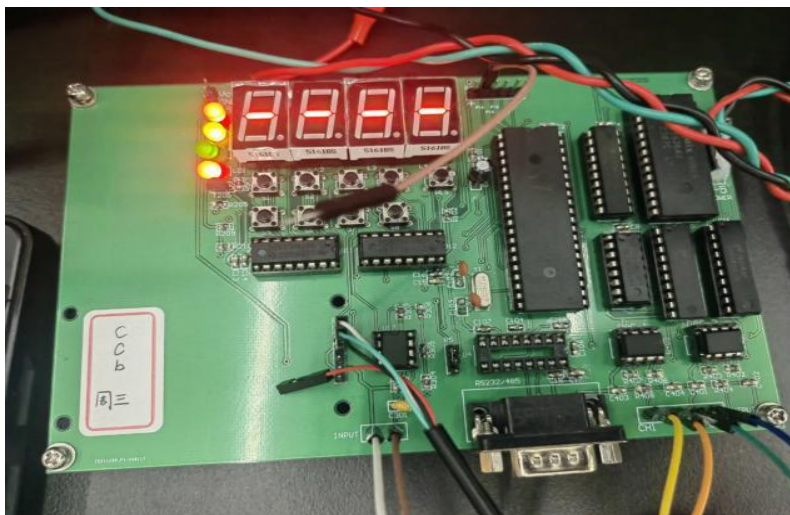


CH1 为输入的 100Hz 正弦波。CH2 为实时显示的正弦波，根据测量结果可知延迟时间为 $\Delta t = 1.6ms$ 。

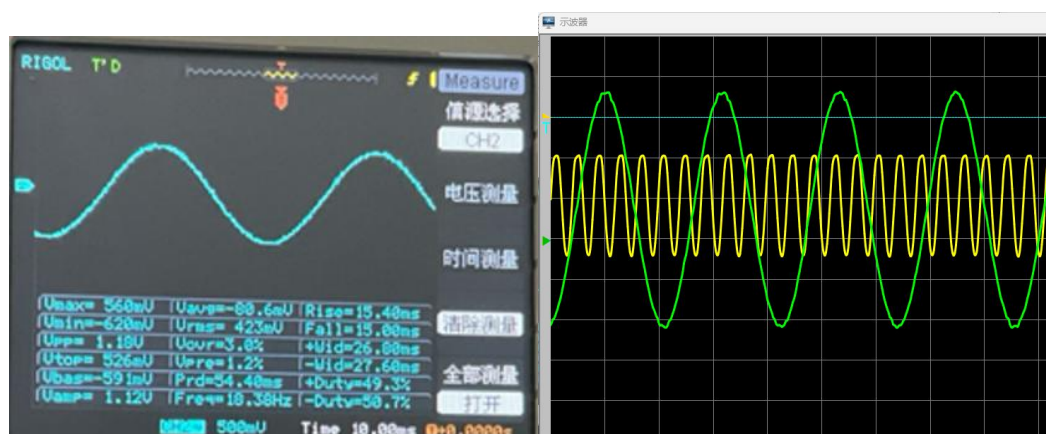
2、实时显示与波形发生输出结果

(CH1 为实时显示；CH2 为波形发生的输出结果)

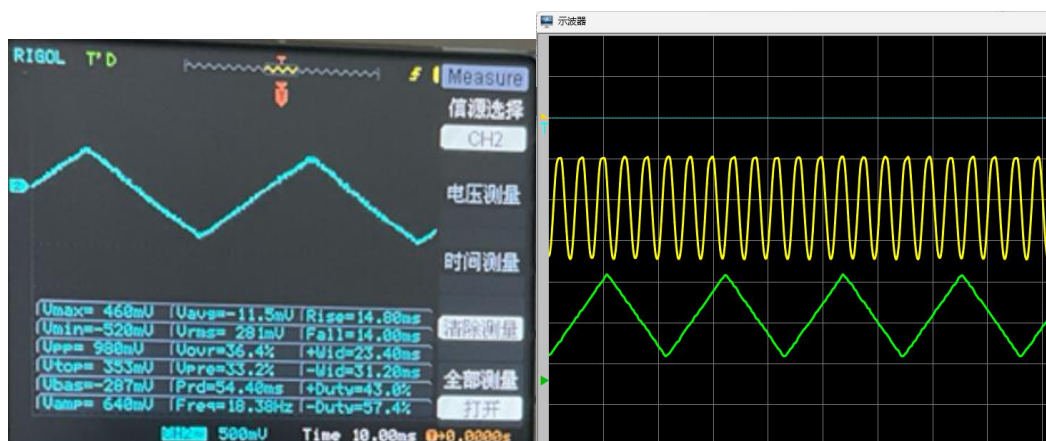
复位状态下：



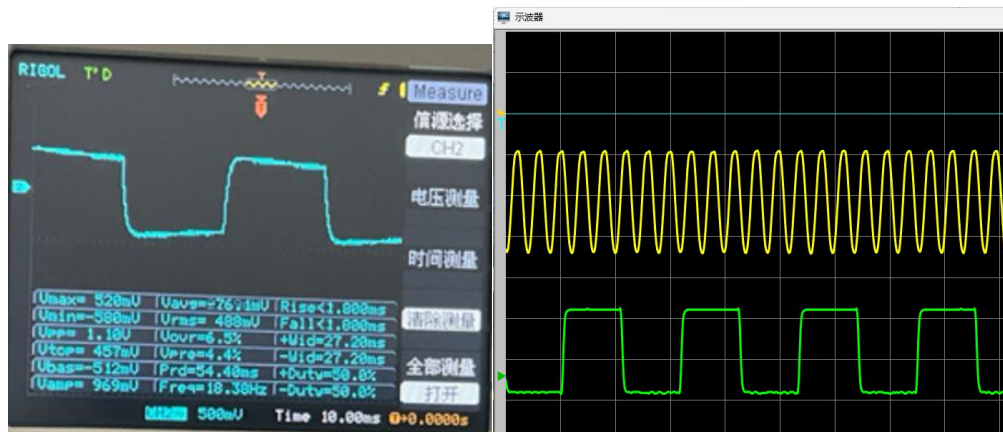
(1) 基础波形生成能力



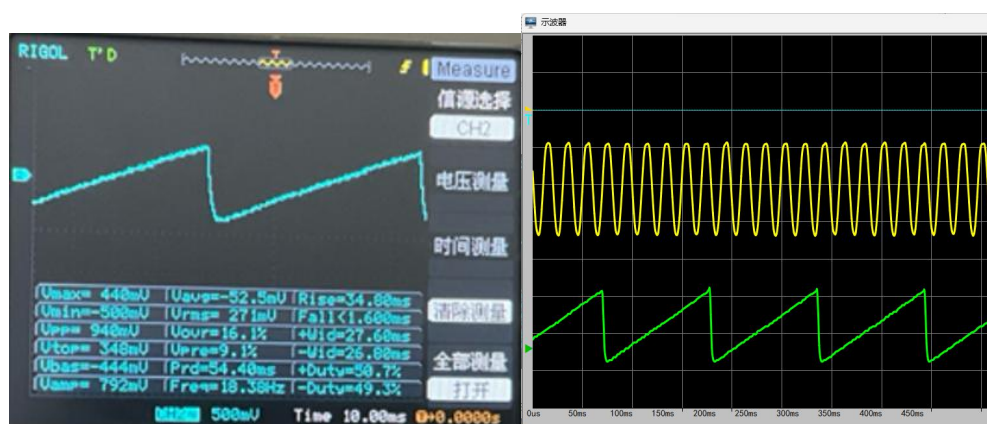
正弦波



三角波



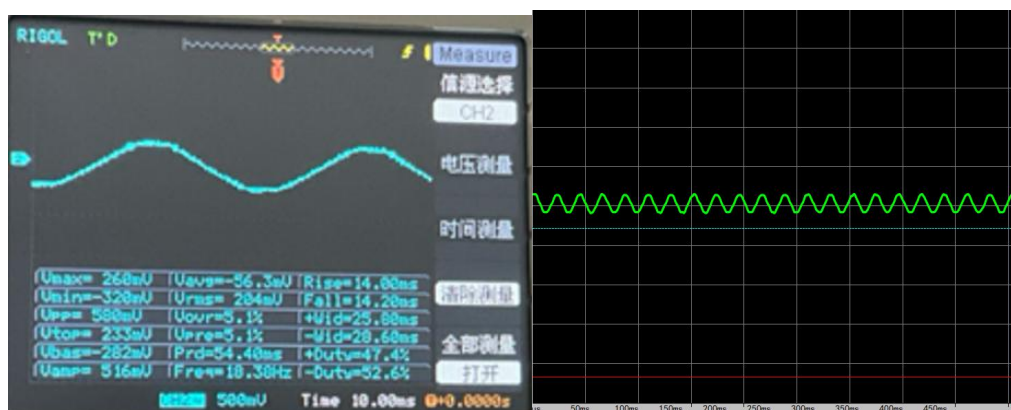
方波



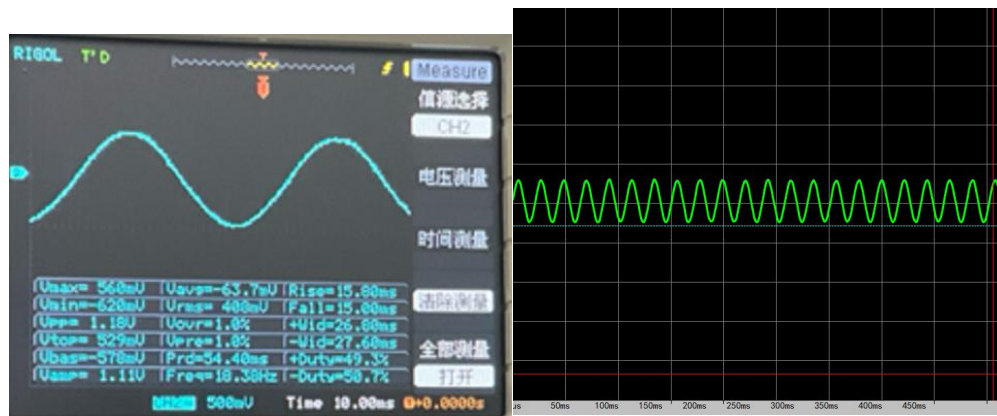
锯齿波

(2) 调幅功能测试 (正弦波)

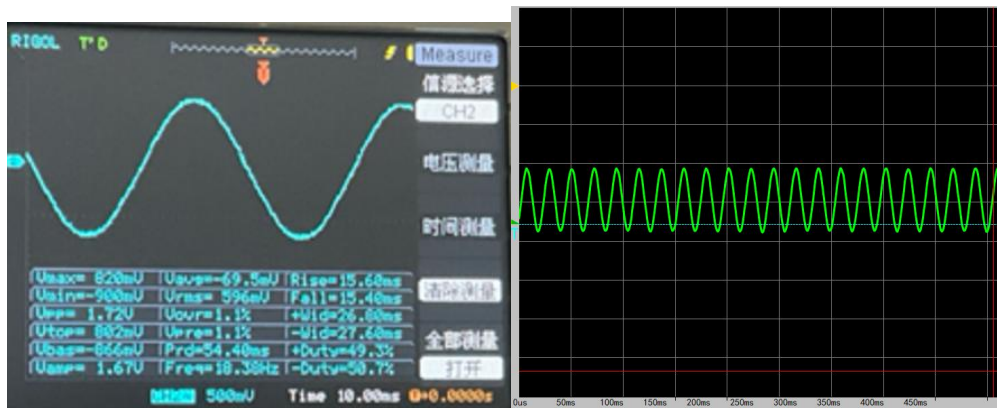
最初调幅乘以波形偏离中心的幅度太大,担心达到运放的最大输出上限出现失真,因此调低了响应的 offset。



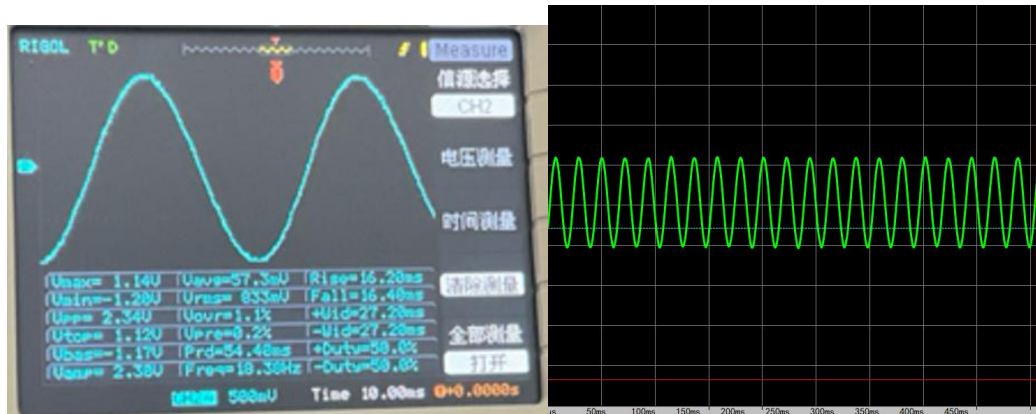
第一档幅值输出: 580mV



第二档幅值输出：1.18V



第三档幅值输出：1.72V

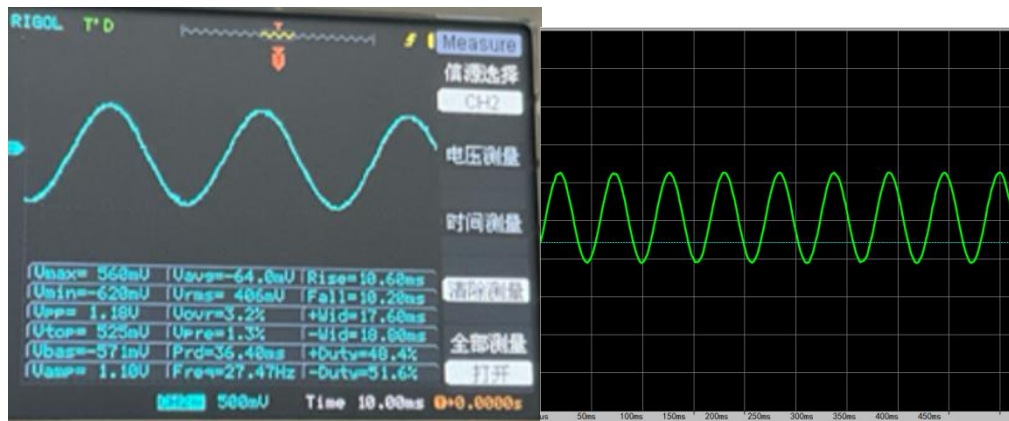


第四档幅值输出：2.34V

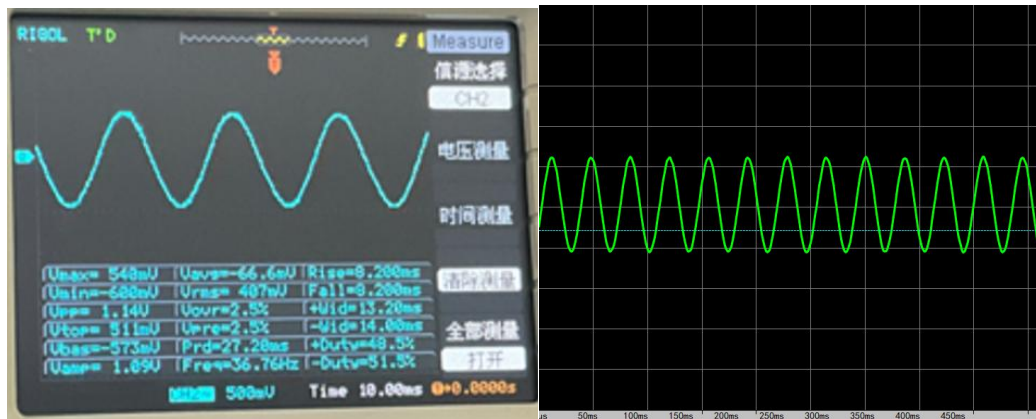
(共 9 档，这里仅展示调 4 档的结果图，完整结果于下方表格中列出)

档位	1	2	3	4	5	6	7	8	9
幅值/V	0.48	0.72	1.04	1.28	1.92	2.16	2.48	2.72	3.04

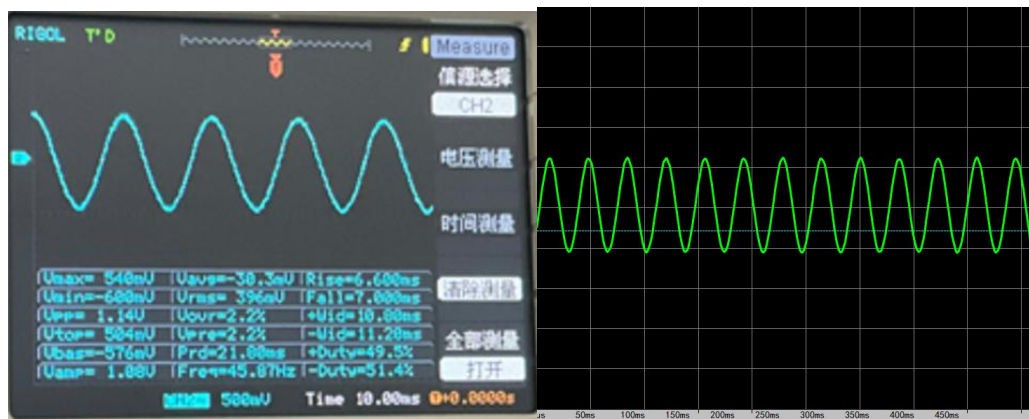
(3) 调频功能测试 (正弦波)



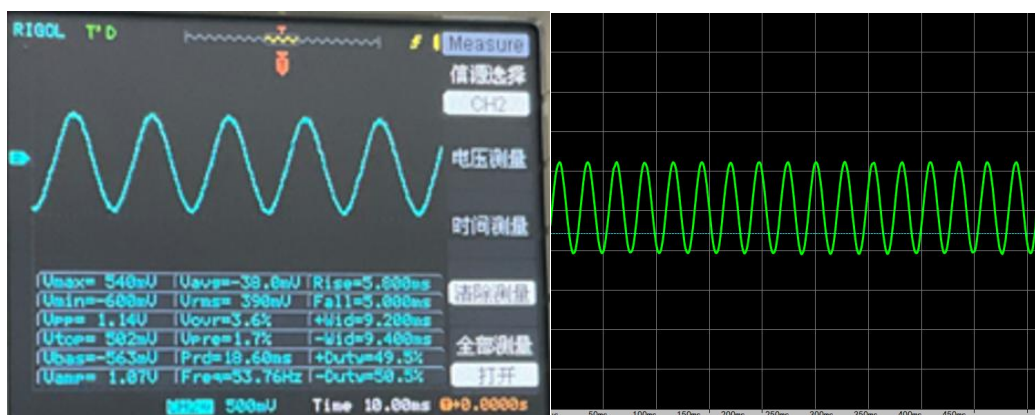
第一档频率输出：27.47Hz



第二档频率输出：36.76Hz



第三档频率输出：45.87Hz



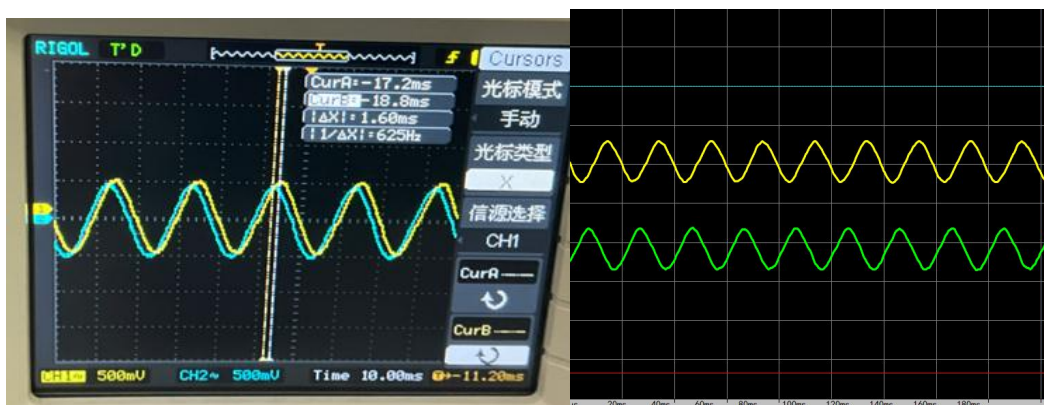
第四档频率输出：53.76Hz

（共 9 档，这里仅展示调 4 档的结果图，完整结果于下方表格中列出）

档位	1	2	3	4	5	6	7	8	9
频率 /Hz	18.38	27.47	36.76	45.87	53.76	64.10	73.53	80.65	92.69

3、波形回放性能分析

对之前实时显示时的波形存储后回放（以正弦波输出为例）



波形回放显示

输入频率	50	60	70	80	90	100	400	300
实际频率	50	59.52	69.44	80.65	89.29	100	390.6	304.9

波形回放时的波形与实时显示时的输入频率仅有轻微区别，说明功能实现良好。实时显示与回放波形只有相位上有不同，延迟时间见上文。

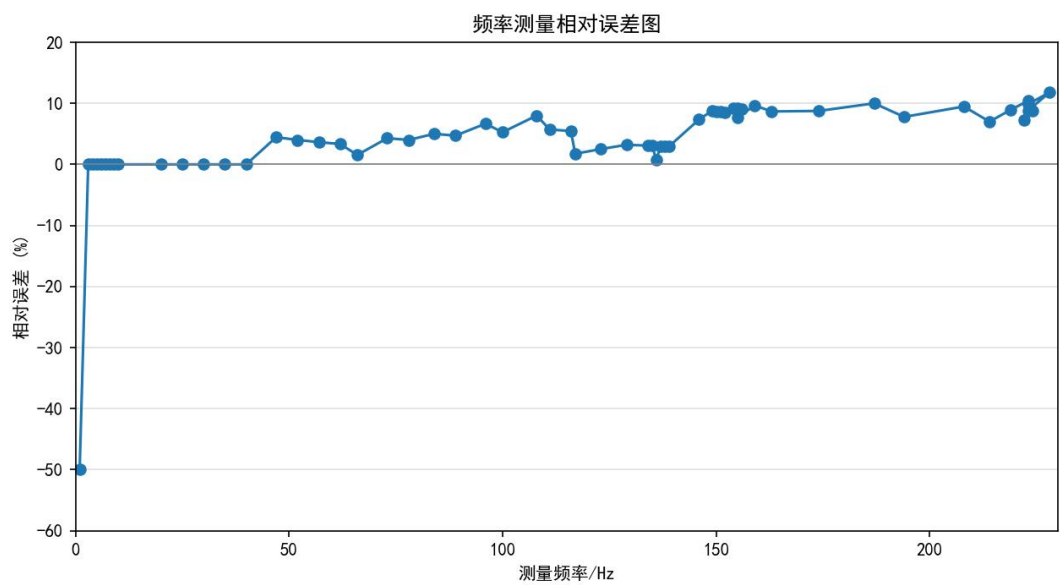
4、频率与幅度测量误差分析

（1）实验板输入信号发生器的正弦波形，选择**频率测量**模式，改变信号发生器输出波形频率，观察数码管显示的测量结果，记录数据如下：

输入频率/Hz	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	25	30
测量结果/Hz	1	3	4	5	6	7	8	9	10	20	25	30

输入频率/Hz	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
测量结果/Hz	35	40	47	52	57	62	66	73	78	84	89	96
输入频率/Hz	95	100	105	110	115	120	125	130	131	135	133	134
测量结果/Hz	100	108	111	116	117	123	129	134	135	136	137	138
输入频率/Hz	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	150
测量结果/Hz	139	146	149	150	151	152	154	155	156	155	159	163
输入频率/Hz	160	170	180	190	200	201	202	203	204	205	206	207
测量结果/Hz	174	187	194	208	214	219	223	223	228	223	224	222

测量误差与输入频率的关系如下：



测量频率下限为 3Hz（理论上应该更高），因为频率测量基于**过零检测**（上升沿触发），需至少捕捉一个完整周期的信号。当信号频率低于 3Hz 时，周期大于 333ms，而**采样窗口**（AD_LEN=500 点，采样率 1851Hz，窗口时间约 270ms）内无法包含完整周期，导致峰值计数失败（freq_cnt 不足）。以上为主要原因，当然还有噪声导致误触发的次要原因。

实际采样率为 1851Hz，根据奈奎斯特定理，可测最高频率为 925Hz（采样率的 1/2）。但在实验中，随着输入频率上升，测量相对误差保持在 10%以内，在超过 204Hz 后得到的频率不升反减。经过思考与交流，我们怀疑高频测量异常的核心原因是**中断处理耗时过长导致采样时序紊乱**。

在我们的代码里，定时器 0 中断（高优先级）内包含 get_adc()（ADC 轮询等待）、save_adc()（数据存储）、waveGenerate()（波形计算）、disp_da()（DA 输出）等操作，单次中断处理时间相当高；倘若让中断仅负责快速采样与

标志位设置，将显示扫描（dsptask()）、按键处理（key_service()）移至定时器 1 中断（低优先级），理论上主中断处理时间将大大降低，确保高频信号下采样间隔稳定（尽管调试下来未调通）。

在主循环中，我们通过 disp_cnt 触发显示扫描（每 3ms 一次），与中断中的 disp_da() 形成资源竞争（如操作 74HC595 的 D_SER/D_SRCLK 引脚），也可能导致中断响应延迟。

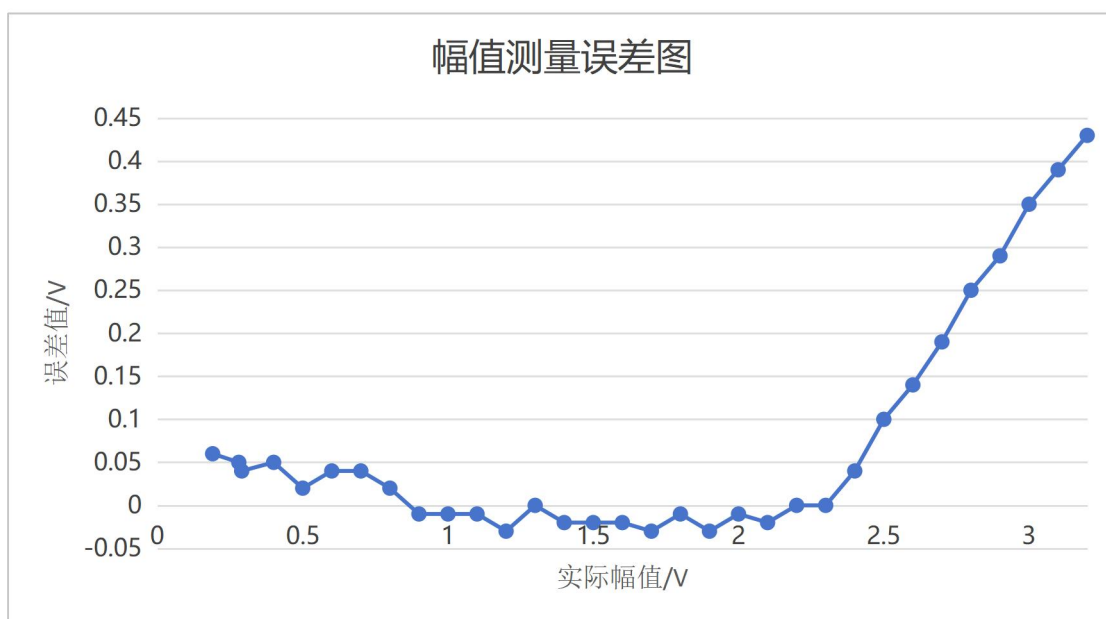
算法方面，固定窗口极值对高频信号（如 200Hz，周期 5ms）来说，在窗口内仅能检测到约 50 个点，易受中断延迟导致的采样点错位影响（如上升沿出现在两次中断之间，漏测关键过零点）。也许这方面的改进可以使用实时周期测量法，通过检测相邻过零点的时间差（基于定时器计数值），避免依赖固定窗口。

换句话说，这也是 51 单片机的硬件诟病，正如我们同学交流时某位的发言：“所有在 51 这种上古单片机上进行复杂数学处理的要求都是非人道的。假如课程用一片 4 元的 stm32f103 代替，成本是他的 1/5，主频是 6 倍，RAM 是 3 倍”。因此，我们强烈建议课程与时俱进，教学更加贴近实际业界应用的 32 系列单片机。

（2）实验板输入信号发生器的正弦波形，选择**幅度测量**模式，改变信号发生器输出波形幅度，观察数码管显示的测量结果，记录数据如下：

输入 V_{p-p}/V	0.19	0.28	0.29	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
测量结果/V	0.13	0.23	0.25	0.35	0.48	0.56	0.66	0.78
输入 V_{p-p}/V	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
测量结果/V	0.91	1.01	1.11	1.23	1.3	1.42	1.52	1.62
输入 V_{p-p}/V	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4
测量结果/V	1.73	1.81	1.93	2.01	2.12	2.2	2.3	2.36
输入 V_{p-p}/V	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2
测量结果/V	2.4	2.46	2.51	2.55	2.61	2.65	2.71	2.77

测量误差与输入电压的关系如下图：



测量幅度范围为 0.19-2.40V。

下限是由于算法和噪声等原因，主要原因包括模拟输入电路的**噪声**会干扰小信号的极值捕捉，当信号幅值小于噪声幅值时，极值比较就失败了。而且低频小信号的极值**变化缓慢**，在固定窗口（AD_LEN=500 点）内可能无法触发有效更新，这也是 51 的一个**局限性**。

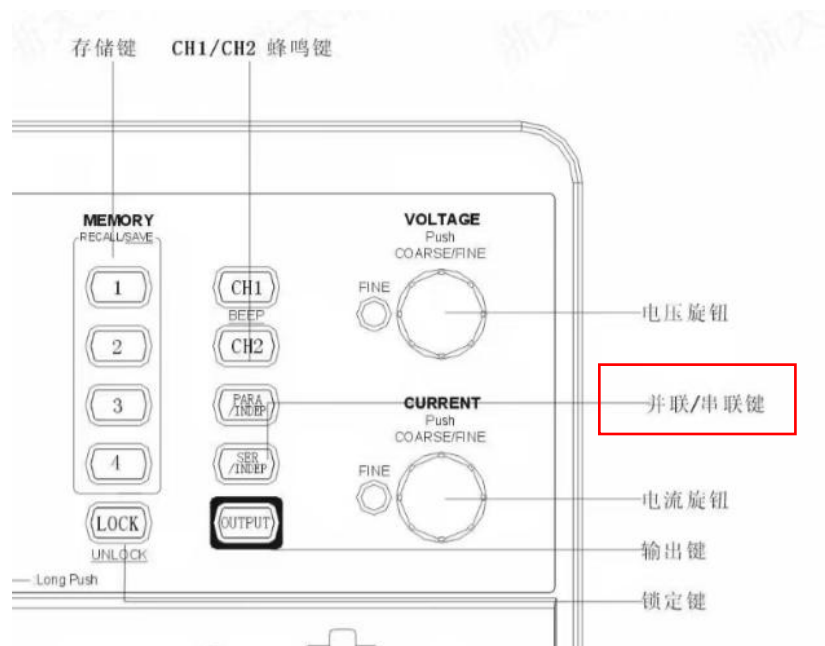
上限是由于运放的限制。运放输出范围并不是标准的 0-5V，而是 0-3.7V，在模拟输入电路将输入的基线提高了 2.5V 之后，幅值的一半为 1.2V，也就是说 CPU 的 AD 最高可以接收到幅值为 2.4V 的信号。因此在误差允许范围内，测量幅度范围为 0.07-2.40V。

七、讨论与心得

本次实验历时八周，作为一项工作量较大的实验，我们在设计与调试的过程中遇到了许多问题，由此也总结出一些心得感想如下：

1. 善于查看并研究实验室各仪器的使用说明手册

由于本次实验中需要+5V/GND/-5V 三个输入，仅使用单个恒定电压源是不够的，将恒压源的 CH1、CH2 输出口使用导线相接又略显接线冗杂。通过研究实验室的恒流源说明书我们了解到恒压源有一个串联模式，可以用于有公共端串联的输出，从而使接线变得简单明了。



2. 遵循“先硬后软”的实验思路

实验事先已经提供了电路原理图和电路板，只需要依照图纸进行焊接即可，但因为焊接技术的不过关（例如焊锡太多导致虚焊），使得我们在第二阶段硬件调试的过程中，板子总是由于各种原因无法正常工作，甚至一开始因为芯片引脚部分焊接不当导致无法烧录，为此我们不得不使用万用表笔头按戳芯片引脚才能正常烧录进 hex 文件（被我们戏称戳戳笔）。在硬件调试上我们耗费了四周的时间才确保板子可以正常工作，而这都是因为我们在焊接时没有边焊接边测试电路通断情况。正如老师说的，只有硬件基础做好了，软件的执行才能顺利。没有正确的硬件，我们甚至无从验证软件的正确性。

总的来说，本次实验让我们对电路设计、硬件调试、软件编写的过程有了更加切身的体会，使得我们进一步掌握了电子电路系统设计的基本原理和方法，并初步具备了独立开展电子电路设计制作能力和进行电子系统设计的基本技能。