

# 数字示波器

**摘要：**本设计实现的数字示波器，以 FPGA 和单片机为核心，具有实时采样和等效采样两种采样方式，能对 10Hz~10MHz 的周期信号进行波形显示，无明显失真，并同时显示被测信号的周期与幅值。同时系统还具有可测 2mV 小信号、波形存储回放、测频、触发沿选择、校准信号输出等功能。经测试，系统整体指标良好，垂直灵敏度和扫描速度等各项指标均达到设计要求。

**关键词：**数字示波器，等效采样，实时采样。

## 一、 系统方案

### 1. 方案描述

#### 1.1 总体思路

根据题目垂直灵敏度的要求，本示波器所测信号的幅值范围有三档，分别为 8V，800mV 和 16mV。故需要前级调理电路对输入信号进行处理使其满足 ADC 对输入信号的要求。采用施密特触发器进行触发电平的设置，触发电平由 DAC 输出电压进行调节。对于软件部分，根据题目垂直灵敏度的要求，本示波器要求至少设置三个量程，故需要前级调理电路对输入信号进行处理使其满足 ADC 对输入信号的要求。采用施密特触发器进行触发电平的设置，触发电平由单片机控制 DAC 输出电压进行调节。每一次采样由 FPGA 中的采样控制模块和 FIFO 模块完成，然后允许单片机一次性读取采样数据从而显示和分析数据。

#### 1.2 系统框图

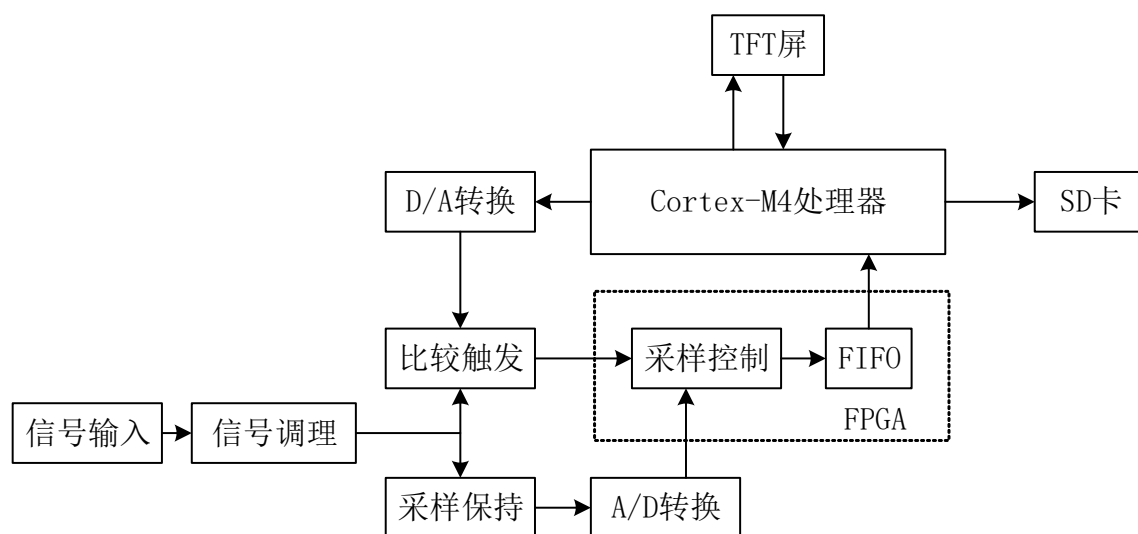


图 1 系统框图

### 2. 比较与选择

#### 2.1 前级信号调理电路方案

方案一：一路调理。将所有输入信号经过同一路调理电路，通过数控衰减器经过相应的衰减或放大处理，使其满足 ADC 对输入信号的要求。

方案二：多路调理。设置不同的档位，分别对应题目要求的三档垂直灵敏度，根据输入信号的具体幅值选择不同的档位。

方案选择：方案一，电路简洁，但由于输入信号幅值跨度大，硬件调试比较困难；方案二，电路比较复杂，且不同档位之间可能有相互影响，但便于调试；。综合考虑，选择方案二。

## 2.2 频率测量算法方案

方案一：快速傅里叶变换（FFT）得到信号频谱后取频谱峰值对应频率作为信号频率。

方案二：示波器水平测量的第一算法算得周期后计算得到频率。

方案选择：方案一需要使用 FFT 算法对 256 个数据（200 个采样数据+56 个补 0 数据）进行分析，数据的个数决定 FFT 算法的精度，单片机系统计算性能差且数据个数少。方案二由信号毛刺带来的干扰很大，需要先确定电压阈值，可使用触发电平作为此阈值算法简单精度较高。综合考虑，采用方案二。

## 2.3 垂直轴测量类型选择

方案一：示波器垂直测量的第一算法求得幅值。

方案二：峰峰值。

方案选择：方案一可以消除一部分毛刺干扰，但是算法复杂。方案二会保留毛刺信号的误差，但是算法简单，对于单频率测量精度也可以满足本题要求。综合考虑，选择方案二。

# 二、 理论分析与计算

## 1. 系统原理

本系统采用 FPGA 和单片机为核心，对输入模拟信号进行调理之后经过 ADC 采样为数字信号，经过核心处理后在 FTF 屏上显示出输入信号的波形与相应参数。信号调理电路由三档放大或衰减电路构成，分别对应 8V，800mV，16mV 三个档位，对输入信号分别进行衰减 4 倍，放大 2.5 倍，放大 121 倍，以满足 ADC 0~3V 的量程。触发电路为施密特触发器，DAC 输出电压作为其参考电压，从而

使其触发电平可调。采样与保持电路由一阶 RC 滤波器构成，通过控制模拟开关的通断对电容进行充放电，实现采样与保持信号的功能。

## 2. 等效采样分析

本题要求至少有两个等效采样档位，水平轴分别为  $2\mu\text{s}/\text{div}$ 、 $100\text{ ns}/\text{div}$ ，顺序等效采样方式要求在每次触发在每个波形上只采样一个数据，每次采样延时一个已知的  $\Delta t$  时间，以实现等效于  $\frac{1}{\Delta t}$  的采样频率，可以实现低采样速率测量高带宽信号。

本系统一次采样数据个数设置为 200 个，分为 10div 以满足题设要求，所以对时间轴为  $2\mu\text{s}/\text{div}$  的档位，采样周期为  $T = \frac{2\mu\text{s}}{20} = 0.1\mu\text{s}$ ，采样速率为  $10\text{MSa/s}$ 。所以要求每次采样延时  $\Delta t = \frac{1}{10\text{MSa/s}} = 100\text{ns}$ 。

同理对应时间轴为  $100\text{ns}/\text{div}$  的档位，采样周期为  $T = \frac{100\text{ns}}{20} = 5\text{ns}$ ，采样速率为  $200\text{MSa/s}$ 。所以要求每次采样延时  $\Delta t = \frac{1}{200\text{MSa/s}} = 5\text{ns}$ 。

## 3. 垂直灵敏度分析

本题垂直灵敏度要求为  $1\text{V}/\text{div}$ 、 $100\text{mV}/\text{div}$ 、 $2\text{mV}/\text{div}$  三档，电压测量误差  $\leq 5\%$ ，输入短路时输出噪声峰峰值小于  $2\text{mV}$ 。因为要求系统垂直分辨率为 8 位，即有 256 个可分辨值，若满量程由分辨率精度低带来的误差为  $\gamma = \frac{1}{256} \times 100\% = 0.391\%$ ，本系统正常测量信号输入为量程的  $\frac{2}{3}$  倍，相比于电路实现可以忽略不计。采用 16 位 ADC 可以保证最低位的精度。

对应垂直轴  $1\text{V}/\text{div}$  档位，测量幅值量程为  $8\text{V}$ ，单极性 ADC 的参考电压为  $3.0\text{V}$ ，经过加法器偏置  $1.25\text{V}$  后，可输入 ADC 的电压范围为  $\pm 1\text{V}$ ，所以此档岗前级调理电路需要衰减 4 倍，灵敏度为  $\alpha = 4 \times \frac{1}{256} \times 3.0\text{V} \approx 0.047\text{V}$ 。同理，对于  $100\text{mV}/\text{div}$ 、 $2\text{mV}/\text{div}$  档位，前级调理电路分别需要放大 2.5 倍和 15 倍，灵敏度分别为  $4.7\text{mV}$  和  $0.98\mu\text{V}$ 。

## 4. 扫描速度分析

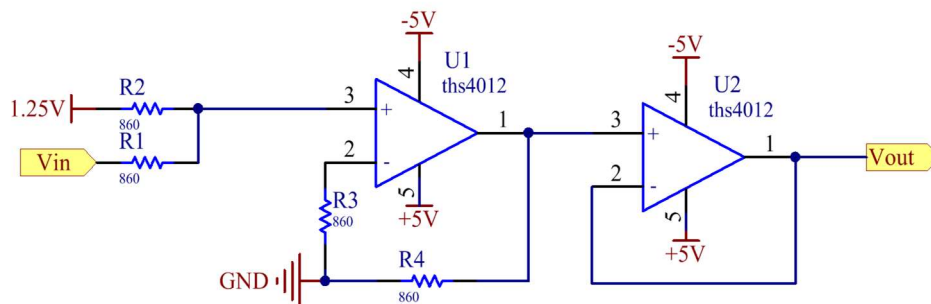
本系统采用液晶屏显示波形，对应水平轴 20ms/div 档位，测量最大周期为  $T = 20ms/div \times 10div = 200ms$ ，即最小频率为 5Hz，同理 2μs/div、100 ns/div 档位分别对应最小测量频率为 50kHz 和 1MHz。

本系统采用线性内插方式拟合数据，以优化显示效果，对于线性内插，每个周期采样 10 点即可很好地还原正弦波形，所以考虑视觉效果，20ms/div，2μs/div、100 ns/div 档位分别可以还原最大频率为 100Hz、1MHz 和 20MHz。可以很好满足题目要求测量的信号范围 10Hz~10MHz。

### 三、 电路与程序设计

#### 1. 加法器电路

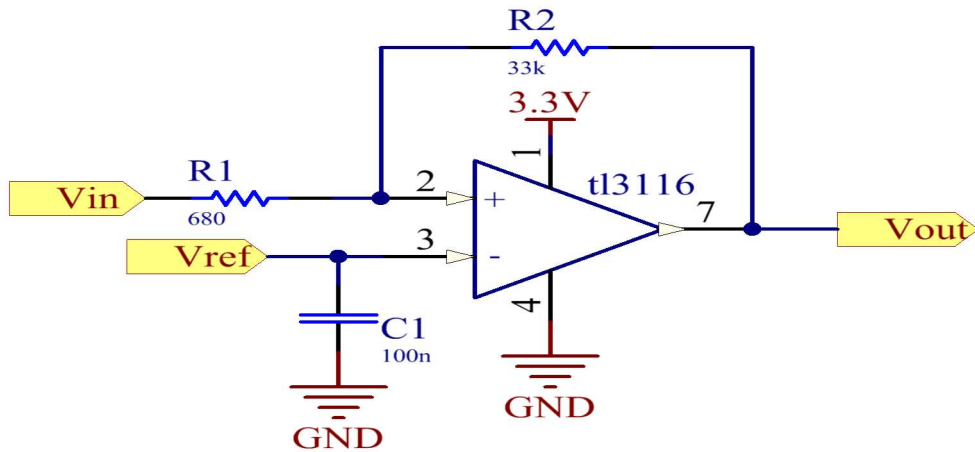
加法器电路如图二所示。对调理电路输出的双极性信号进行+1.25V 的偏置，使其满足 ADC 的量程。选用 ths4012 高速运放，其带宽为 290MHz，压摆率为 310V/ms，题目要求信号的最大频率为 10MHz，故 ths4012 符合要求。



图二 加法器电路

#### 2. 触发器电路

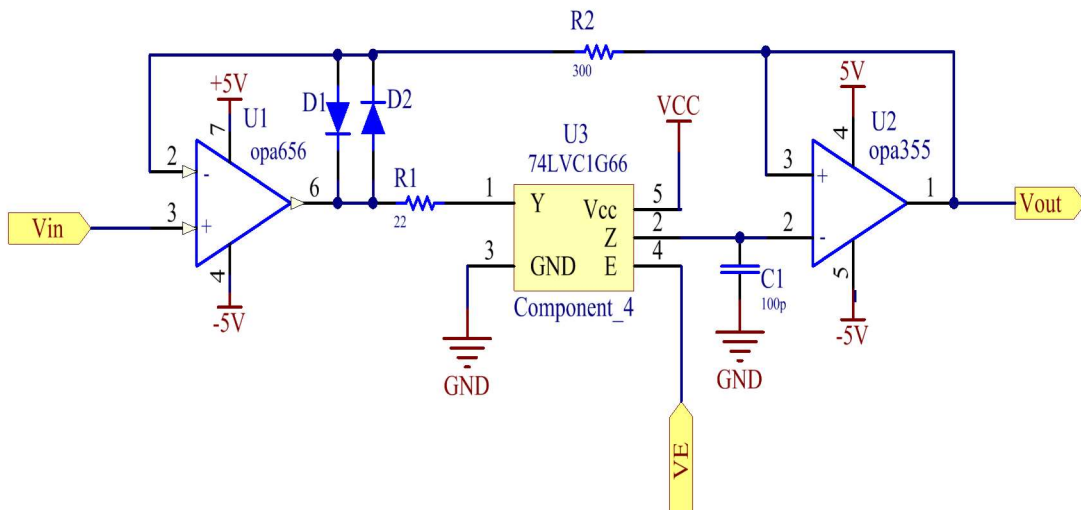
触发器电路如图三所示。比较器选用超高速比较器 tl3116，该芯片具有 10ns 的传输延迟，3.4ns 的上升、下降建立时间。接成同相迟滞比较器形式，可以处理 1Hz 到 10MHz 的信号，而无明显抖动，通过改变参考电平值可以达到改变触发电平的目的。



图三 比较器电路

### 3. 采样保持电路

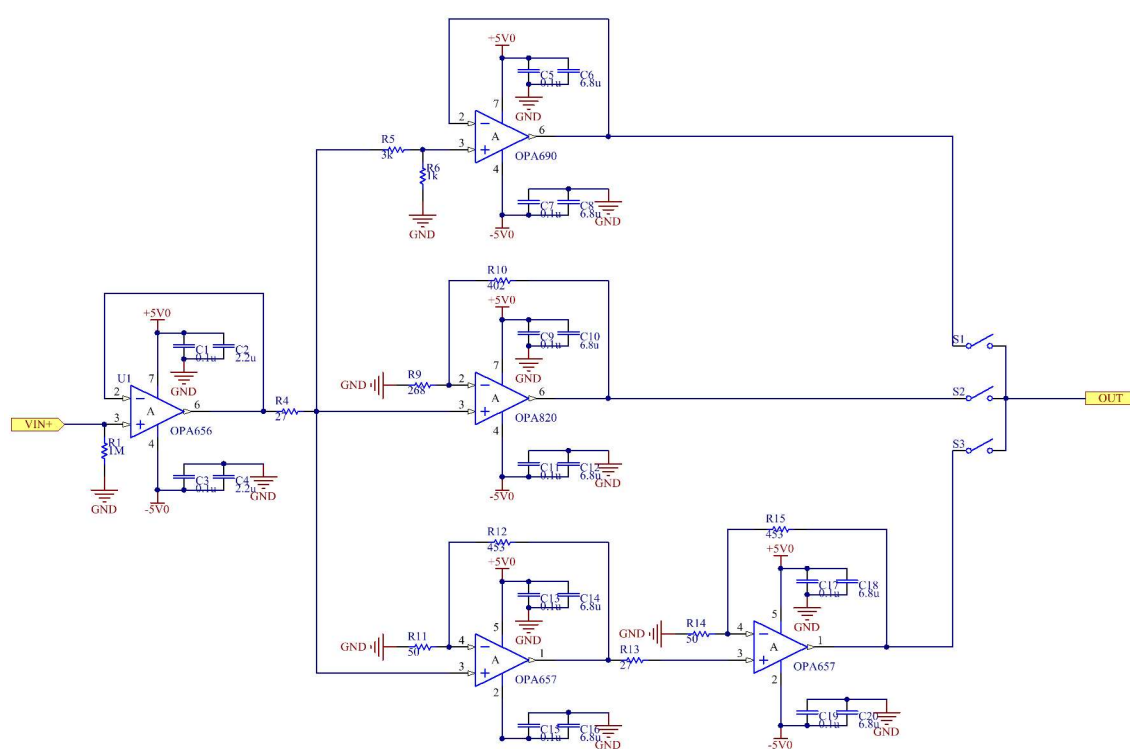
采样保持电路如图四所示。模拟开关选用 74LVC1G66，该模拟开关具有 2.5ns 的通断时间，5V 供电时具有 6Ω 的导通电阻，满足 AD 采样对保持时间的要求。用 opa355 做后级跟随，其输入偏置电流为 3pA，使得电容在开关断开后不会损失过多电流，保证保持时间足够长。



图四 采样保持电路

### 4. 前级调理电路

前级调理电路如图五所示。前级加一级跟随，以驱动后面各个档位的运放。该跟随器选用 opa656，其输入电阻高（ $10^{12} \Omega$ ），单位增益稳定。再在输入信号端并联一  $1M \Omega$  的电阻以满足题目对输入电阻的要求。衰减档位（8V 档）利用  $3K \Omega$ （R5）和  $1K \Omega$ （R6）的电阻进行分压，让信号衰减为原来的  $\frac{1}{4}$ ，加上一级高带宽运放 opa690，以增强其带负载的能力。800mV 档设置为 2.5 倍放大电路，放大器选用 opa820，其带宽为 240MHz，由于输入信号的最高频率为 10MHz，故 820 满足要求。16mV 档利用两级放大，一级放大 11 倍，共放大 121 倍。放大器选用高带宽运放 opa657，其带宽为 1.6GHz，压摆率 700V/us，满足题目要求。

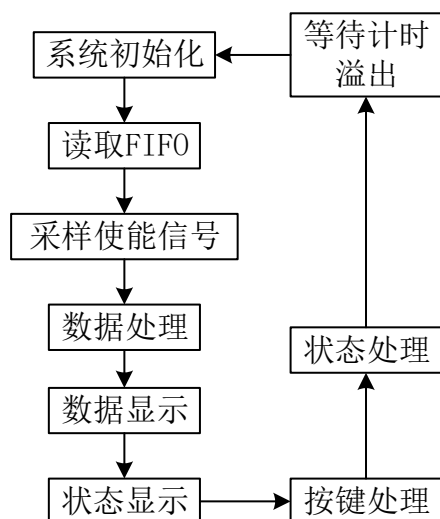


图五 前级调理电路

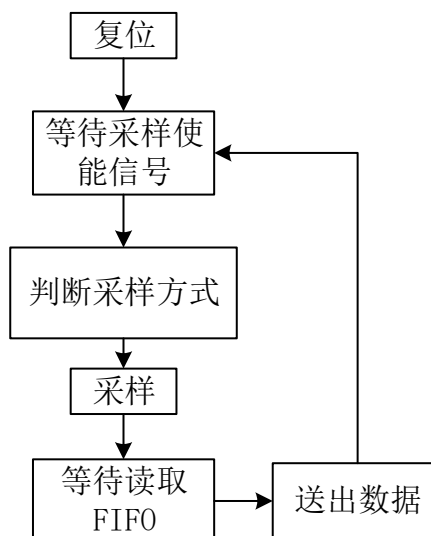
## 5. 软件程序设计

程序设计流程图如图六所示。

MCU:



FPGA:



图六 程序设计流程图

## 四、 测试方案与测试结果

### 1. 测试环境

示波器: Tektronix MSO 2002B 数字示波器;  
扫频仪: RIGOL DSA1030A 数字频谱分析仪(9kHz~3GHz);  
电 源: DF1731SL1ATA 稳压源。

### 2. 测试方案

#### 1) 垂直灵敏度测试方案

信号源输出频率为 10KHz，幅值不同的方波，用本系统测量。测量结果如表一所示。

#### 2) 扫描速度测试方案

垂直灵敏度 0.1V/div。用信号源输出峰峰值为 0.6V，不同频率的正弦波，用本系统进行测量。测量结果如表二所示。

#### 3) 校准方波测试方案

直接将输出方波接入示波器进行测试。



### 3. 测试结果与数据

#### 3.1 垂直灵敏度测试

表 1 垂直灵敏度测试表

档位	输入 $V_i/V$	输出 $V_o/V$	误差
1V/div	8	7.8	2.50%
	6	5.8	3.33%
	4	4.1	2.50%
	2	2.1	5.00%
0.1V/div	0.8	0.77	3.75%
	0.6	0.61	1.67%
	0.4	0.38	5.00%
	0.2	0.21	5.00%
2mV/div	0.016	0.0154	3.75%
	0.008	0.0081	1.25%
	0.004	0.0039	2.50%
	0.002	0.0021	5.00%

#### 3.2 扫描速度测试

表 2 扫描速度测试表

档位	输入信号周期 /s	输出信号周期 /s	误差
20ms/div	0.1	0.0102	2.0%
	0.02	0.0205	2.5%
2 $\mu$ s /div	$2 \times 10^{-6}$	$2.05 \times 10^{-6}$	2.5%
	$5 \times 10^{-6}$	$5.1 \times 10^{-6}$	2.0%
	$10 \times 10^{-6}$	$9.8 \times 10^{-6}$	2.0%
100 ns/div	$100 \times 10^{-9}$	$102 \times 10^{-9}$	2.0%

	$200 \times 10^{-9}$	$206 \times 10^{-9}$	3.0%
	$1000 \times 10^{-9}$	$990 \times 10^{-9}$	1.0%

### 3.3 校准方波测试

经测试 100kHz 的方波校准信号的电压幅值为 0.298V，误差为 0.67%，满足指标要求。

## 4. 测试结果分析

- 幅值误差：为消除各级引入的直流偏置，本设计在级与级之间均加上了隔直电容，对低频信号的幅度会产生一定的影响。
- 频率误差：由于系统模块较多，分布参数影响较大，以及信号源自身输出信号也不完全稳定，故测得的信号频率，特别是高频信号的频率会有一些的误差。
- 测试结果分析：根据表中数据可知，测量结果都在测量误差允许范围内，满足题目要求的误差 $\leq 5\%$ ，很好地完成了设计任务。

## 五、 参考文献

- [1]. 严国萍、龙占超，《通信电子线路》，2006 年 2 月，科学出版社；
- [2]. 罗杰、谢自美，《电子线路-设计·实验·测试》，2008 年 4 月，第四版，电子工业出版社；
- [3]. 华中科技大学电工电子科技创新中心，《SST 单片机实践教程》，2011 年 6 月，第六版；
- [4]. 严润卿，李英惠，《微波技术基础》，2004 年 5 月，北京理工大学出版社；
- [5]. 康华光，电子技术基础（模拟部分）（第五版），2005 年 7 月，高等教育出版社。