

信号检测与展示 装置设计与实现

TI杯模拟电子系统设计专题赛

报告人：胡仁杰



CONTENTS

目录

01 竞赛赛题

03 设计要点

05 作品介绍

02 任务分析

04 设计报告

06 竞赛环境

01

赛题



信号检测与展示装置

01

基本信号检测

设计装置需能准确检测并显示周期性基本信号的关键参数，如**波形、最大值、最小值、频率**等，确保误差控制在5%以内，满足精确测量需求。

03

复杂信号与单次猝发信号检测

装置应具备分析复杂信号的能力，能在LCD显示器上描绘波形并分析显示**构成信号的频率及幅值**。能够**检测并完整记录持续时间极短的单次猝发信号**，确保关键信息不遗漏。

02

信号波形展示

- 1) 装置必须能够将检测到的**信号波形清晰描绘**在显示屏上，包括至少**两个周期**的波形展示，以及**X-Y坐标轴和单位指示**，便于直观观察和分析信号特征。
- 2) 用舵机驱动紫外激光笔，在感光纸上描绘信号波形。

02

任务需求分析



被测信号与参数范围

01

信号源类型

信号源可以产生多种类型的信号，包括正弦波、锯齿波、脉冲波等基本周期信号，以及由这些基本周期信号复合形成的复杂周期信号或单次猝发信号。

02

信号频率范围

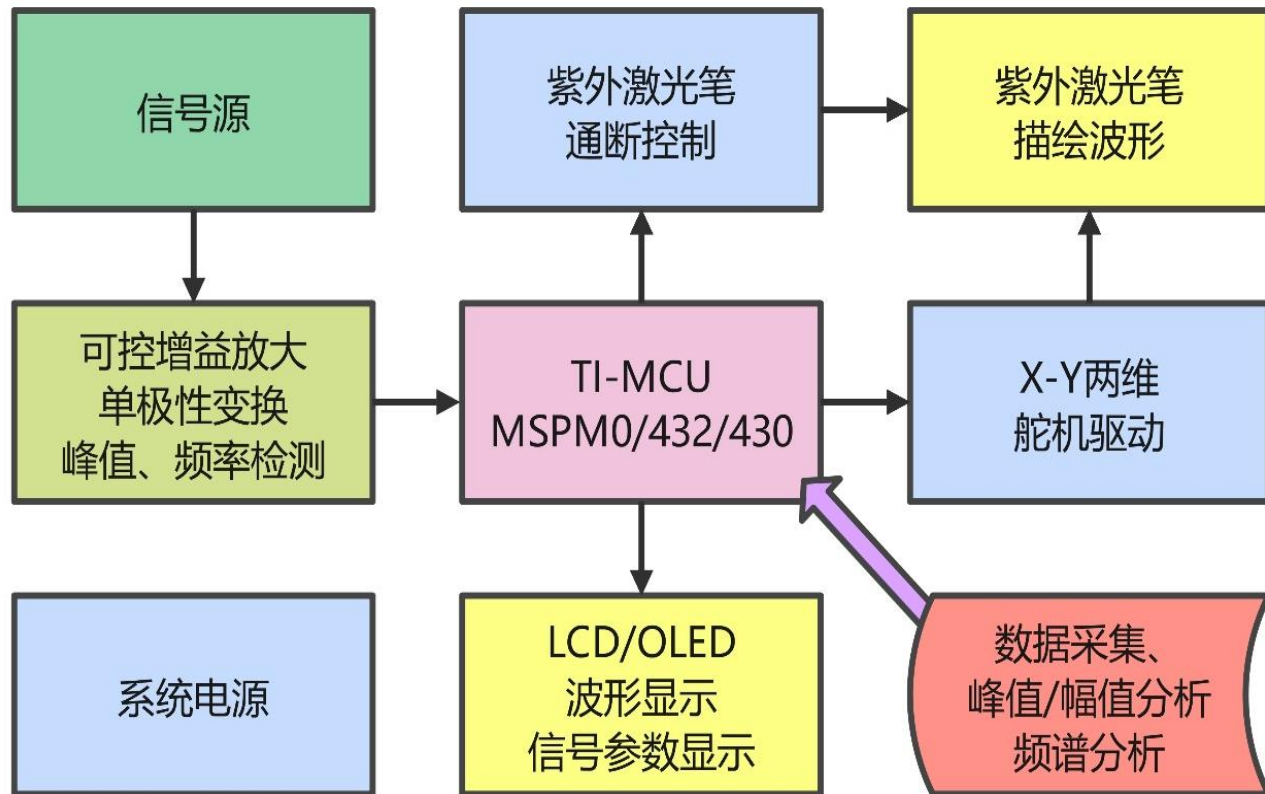
信号源产生的信号频率范围限定在100Hz到10kHz，属于低频范围，由此推断ADC采样频率要求。

03

信号峰峰值参数

信号源产生的信号峰峰值介于0.5V至5V之间，这此参数及所选择ADC的输入电压范围，确定AD转换前模拟信号处理要求。

任务分析-系统功能结构



系统结构概述



信号处理技术

信号处理技术包括程控增益放大、单极性变换、频率和幅值检测等，通过硬件与软件的结合实现精确的信号处理，为后续的分析 and 显示提供基础。



信号采集方法

信号采集通过ADC进行数据采集，计算采样频率并进行数据值转换，采用定时中断采样和DMA自动采样保存，以及FFT频谱分析精度，确保信号准确捕获和分析。



信号显示与描绘

信号显示包括单显示屏或多显示屏显示方式，展示坐标轴及标度、波形、信号参数及频率成份，同时利用激光笔通断控制和舵机驱动电路控制，实现信号的单次描绘或定期重复描绘。

任务分析-待测信号

➤ 基本信号

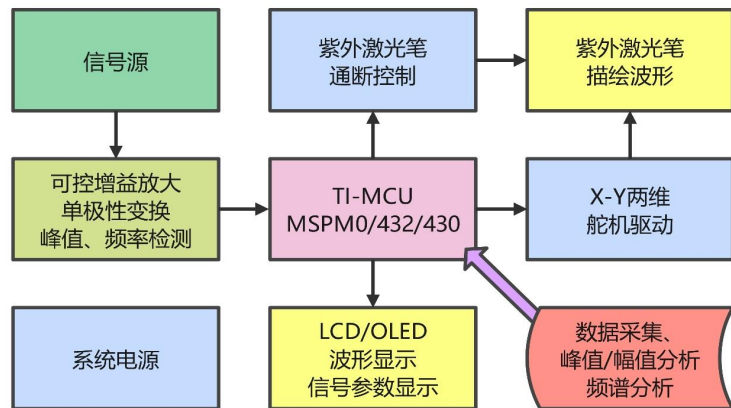
- ◆ 波形：正弦波、三角波、方波
- ◆ 参数：频率、幅值

➤ 复杂信号（合成信号）

- ◆ 波形：文字描述、波形曲线
- ◆ 参数：构成的基本信号；频率成份、幅值（绝对值或百分比）

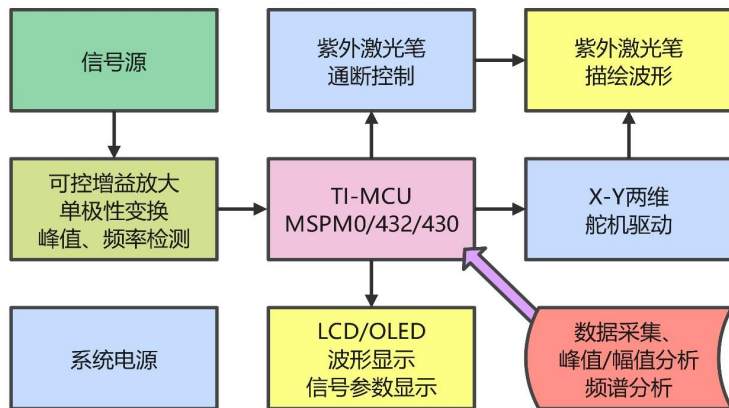
➤ 猝发信号

- ◆ 波形：文字描述、波形曲线
- ◆ 参数：最大幅值、持续时间



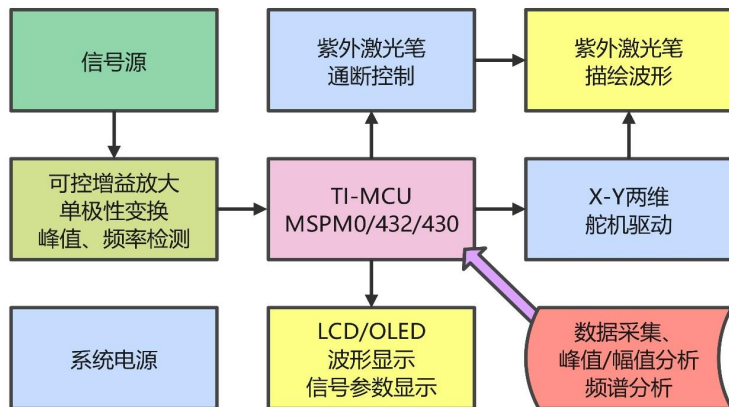
任务分析-信号处理

- **程控增益放大**：将输入信号放大至接近ADC输入量程
- **单极性变换**：输入信号叠加直流分类，适应MCU 单极性ADC输入要求
- **频率检测**
 - ◆ 硬件+软件：过零比较器（施密特）获得周期信号，定时器捕获周期内脉冲数；
 - ◆ 软件方式：寻找中值点采样数据间隔
- **幅值检测**
 - ◆ 波形：文字描述、波形曲线
 - ◆ 参数：构成的基本信号；频率成份、幅值（绝对值或百分比）



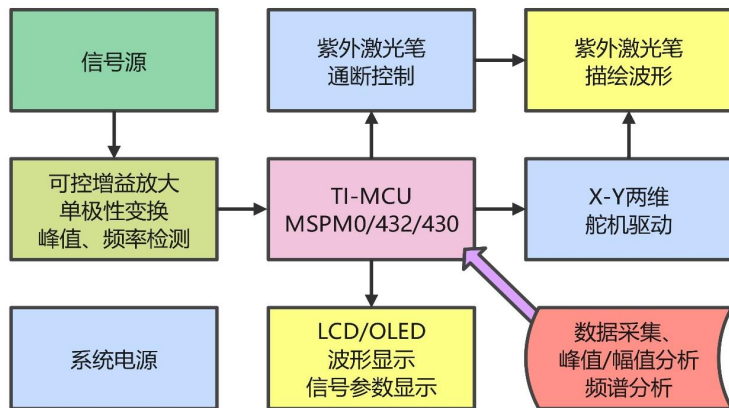
任务分析-信号采集

- **ADC数据采集：采样频率计算，数据值转换（根据增益换算）**
- **信号数据保存：定时中断采样，DMA自动采样保存**
- **频谱分析：FFT分析精度**



任务分析-信号显示

- 显示方式：单显示屏（翻页显示），多显示屏显示
- 坐标轴及标度显示
- 波形显示
- 信号参数及频率成份显示



任务分析- 信号描绘

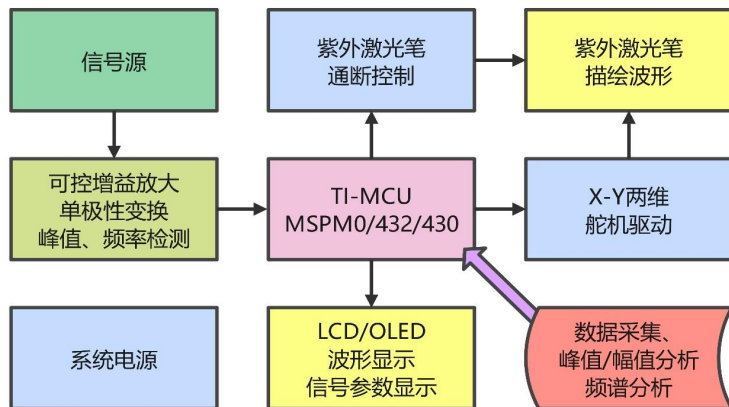
➤ 激光笔通断控制（回扫线消影）

➤ 舵机驱动电路控制

- ◆ DAC-驱动-电压控制转速；
- ◆ PWM电压控制转速；

➤ 信号描绘方式

- ◆ 单次信号描绘；
- ◆ 单次信号描绘、信号变化自动刷新描绘；
- ◆ 信号波形数据定期重复描绘；

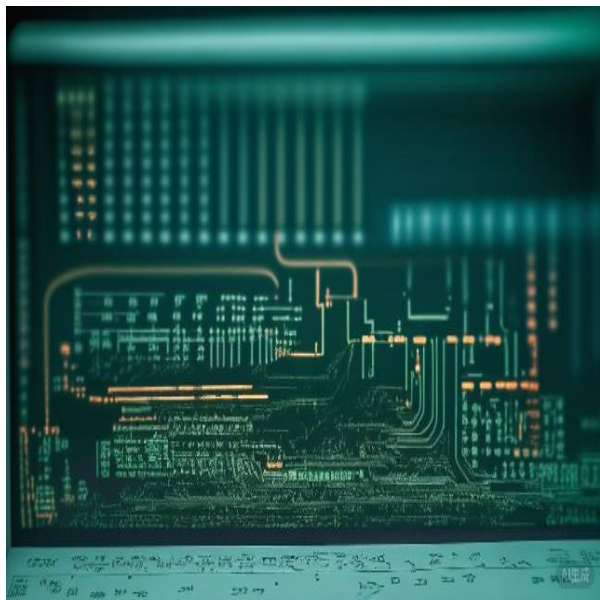


03

系统设计要点



设计要点- 数字信号处理模块



方案一：方波信号转化

通过比较器将输入信号转化为方波信号，利用测周法或测频法测量基波频率，避免了FFT数据处理的复杂性，但需要模拟电路处理，增加了系统设计的复杂度。

方案二：相位解调频率估计

基于相位解调的频率估计方法，通过时间上的相位累计求得原始信号频率，具有高精度和低时间复杂度的优点，但可能面临整周模糊度问题的挑战。

方案三：时频域结合测量

结合时频域方法，使用等精度测量法测量方波占空比，并利用比较器触发处理捕获单周期信号，通过频谱分析信号的谐波特性，提供了一种综合的信号处理方法。

设计要点- 信号调理模块选择

01

方案一高精度运放的选用

在信号调理模块的设计中，选择高精度运放作为核心组件，旨在提高信号处理的精确度和稳定性，确保信号传输过程中的质量不受影响。

02

方案二衰减功能的加入

为了适应不同的信号强度，信号调理模块引入了衰减功能，通过调整信号的幅度，保证输入信号在后续处理中的有效性和准确性。

03

方案三的综合优势

方案三通过结合高精度运放和衰减功能，不仅提升了信号处理的精度，还增强了系统的灵活性和适应性，为复杂信号处理提供了可靠的解决方案。

设计要点- 相位解调频率估计

相位解调频率估计原理

相位解调频率估计通过FFT进行初步频率估算，再利用相位信息在FFT峰值附近细化频率值，特别适用于实信号处理，提高频率估计的精确度。

整周模糊度问题

在相位解调频率估计中，大延迟可能导致整周模糊度问题，即经过多个 2π 周期后可能出现误差，这是算法需要解决的一个关键问题。

01

02

03

算法实现步骤

该算法首先执行FFT以粗略估计频率，然后在FFT峰值附近选取点，通过相位累计获取更精确的频率值，涉及延迟采样和指数相位差的计算。

等精度测量法

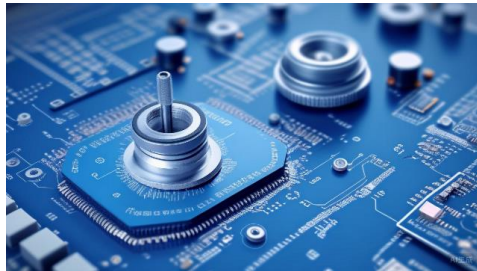
等精度测量法概述

等精度测量法是一种通过相位对齐信号后进行计算来测定频率的技术，特别适用于时域分析方波信号，有效提高测量的精确度。



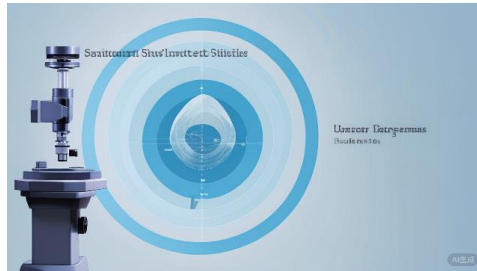
等精度测量法的应用

等精度测量法在模拟电子系统设计中被广泛应用，尤其在信号检测与展示装置中，通过解决相位差带来的误差问题，实现更精确的频率和占空比测量。



等精度测量法的优势

等精度测量法的主要优势在于其能够显著减少由于相位差引起的测量误差，使得测量结果更加准确可靠，对于需要高精度测量的场合尤为重要。

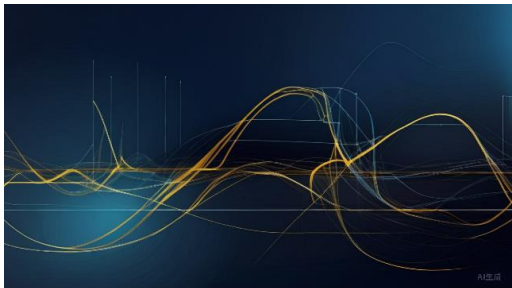


谐波频率测量



谐波阶数与实际幅度

通过测量不同谐波阶数下的实际幅度，可以观察到随着谐波阶数的增加，实际幅度逐渐减小，显示出系统在高阶谐波下的能量衰减特性。



理论与实际幅度对比

对比理论幅度与实际测量的幅度，可以发现低阶谐波时两者较为接近，而高阶谐波时实际幅度显著低于理论值，反映出系统非线性特性的影响。



高阶谐波的测量挑战

高阶谐波的测量结果显示，当谐波阶数增加到一定程度时，实际幅度接近于零，这可能由于测量设备的灵敏度限制或信号本身的衰减所致。

04

系统设计报告



设计报告样例- 摘要

本信号检测与展示装置使用TI官方的MSPM0G3507，将信号源产生的信号接入到信号调理电路以满足单片机采样要求，单片机使用内部运放跟随加功率放大，输出给内部ADC进行采样，采样后的信号经过时频域综合分析，频域使用基于相位解调的频率估计算法，时域使用等精度测量法测量占空比以及通过波形特征进行波形识别，可以做到分别测量幅度值、频率、占空比以及猝发信号的持续时间等参数，满足误差范围之内。

关键词：程控增益 频率检测算法 等精度测量 LCD屏 FFT

设计报告样例- 目录

目录

一、系统方案	4
1.1 系统设计方案	4
1.2 数字信号处理模块的论证与选择	4
1.3 屏幕显示模块的论证与选择	5
1.4 信号调理模块的论证与选择	5
二、系统理论分析与计算	6
2.1 基于相位解调的频率估计算法	6
2.2 等精度测量法	7
2.3 舵机驱动原理	7
三、电路与程序设计	7
3.1 电路设计	7
3.1.1 调理电路模块	8
3.2 程序设计	8
四、测量方案与测试结果	9
4.1 测试方案	9
4.2 测试条件与仪器	9
4.3 测试结果及分析	9
参考文献	12

设计报告样例- 方案论证

▪ 1.2 数字信号处理模块的论证与选择

方案一:

采用比较器,将输入信号转化为方波信号,根据测周法或测频法就可以测得该信号的基波频率,优点是:避免了用FFT进行数据处理,减少了处理复杂度,缺点是需要用模拟电路来进行处理,总系统设计较为复杂。

方案二:

采用基于相位解调的频率估计,通过在时间上对相位进行累计,进一步可以求得原始信号的频率,优点是精度特

方案三:

采用时频域结合的方式,通过等用比较器进行触发处理,来捕获单周综合以上方案,选择方案二和方故,使用方案二也不会引来太高的复

1.3 屏幕显示模块的论证与选择

方案一:采用TFT电阻屏(SPF5408驱动2.8寸)

优点:刷新率高,分辨率较高,成本低。缺点:资源占用率高,驱动复杂,设置界面难度高,触摸实现难度高,稳定性差。

方案二:采用LCD屏幕

优点:功耗低,驱动简单,资源占用低,稳定性好。缺点:屏幕面积较小,分辨率低,不支持触摸,需要添加按键进行交互。

方案三:采用RGB电容屏(4.3寸)

优点:刷新率高,分辨率极高,稳定性好。缺点:成本高,资源占用率高,驱动复杂,设置界面难度高,触摸实现难度高。

综合以上方案,我们选择方案二,采用LCD屏。

设计报告样例- 方案论证

1.4 信号调理模块的论证与选择

方案一：选用高精度运放和模拟开关组成程控增益放大器模块

由于输入信号范围为 0.5 到 5Vpp，而单片机采样范围仅仅是 0 到 3.3V，因此，可以通过程控增益放大器的方式，将信号分为三段，分别进行放大，单片机通过检测峰峰值，改变引脚的值，切换不同的档位。优点是可以自动增益控制，缺点是电路复杂，且在从小幅度波形切换大幅度波形时，若不能及时响应会烧坏单片机，所以还需要添加限幅电路。

方案二：采用高速运放加衰减作为调理模块

由于输入信号的频率范围为 100Hz 到 10kHz，因此，无需要频率特性特别好的运放，但是输入幅度最低只有 0.5，需要满足噪声要求，因此不适合用高速运放。

方案三：采用高精度运放加衰减作为调理模块

题目要求对 0.5V 信号进行调理，属于小信号问题，需要使用高精运放来进行处理，同时兼顾一定的频率特性，选用 TL081，增益带宽积为 5.25MHz，且有较低电压漂移。

综合考虑方案一到三，我们采用了方案三，因为它相对于方案一更加简单，且性价比最高。

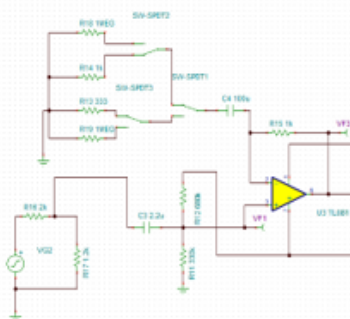


图 2 程

设计报告样例- 分析与计算

二、系统理论分析与计算

2.1 基于相位解调的频率估计算法

基于频谱的峰值检测可以用来进行频率的计算，但是，两个信号距离很近时存在栅栏效应，且两个信号有较大的幅度差异，即远近效应，因此就需要取较多的FFT点数，MCU处理较多FFT点数速度较慢，因此采用基于相位解调的频率估计算法。

对于一般的实信号，可以表示为：

$$\begin{aligned}x(n) &= \alpha \cos(\omega n + \phi) + w(n) \\ &= \frac{\alpha}{2} (e^{j(\omega n + \phi)} + e^{-j(\omega n + \phi)}) + w(n)\end{aligned}\quad (1)$$

若延迟 p 个采样点数，对其相位进行累计，可以得到：

$$x(n-p) = \frac{\alpha}{2} (e^{j(\omega(n-p) + \phi)} + e^{-j(\omega(n-p) + \phi)}) + w(n-p)\quad (2)$$

经过观察不难得到，延迟后的信号与原始信号相差一个指数相位，根据FFT进行频率粗估计，然后再根据FFT峰值附近处选点，可以表示为：

$$\Gamma_k W^H x(n) = \Gamma_k W^H \begin{pmatrix} x(n) \\ x(n+1) \\ \vdots \\ x(n+M-1) \end{pmatrix}\quad (3)$$

其中 Γ_k 为第 k 个峰值附近的行选择矩阵， W^H 为傅里叶变换矩阵，结合式(3)和式(2)，可以得到：

$$\left(\Gamma_k W^H x(n) \right)^H \Gamma_k W^H x(n-p) \approx |g_k|^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 e^{-j\omega_k p}\quad (4)$$

其中 g_k 为行选择矩阵的选择系数，由此就可以解出精准频率：

$$\omega_{fine} = - \frac{\text{angle} \left[\left(\Gamma_k W^H x(n) \right)^H \Gamma_k W^H x(n-p) \right]}{p}\quad (5)$$

但是，这种大延迟也会有一定的约束，也即整周模糊度的概念，也就是经过了很多个 2π 周期，有：

$$-\frac{\pi}{p} \leq \omega_{fine} \leq \frac{\pi}{p}\quad (6)$$

对于幅度估计就是进行傅里叶变换，在频谱上得到幅度信息，存在远近效应，需要考虑串行干扰相消，首先需要消除幅度大的信号，有公式：

$$\alpha = 2 \left| \sum_n \left(x(n) - \sum_j \left(\frac{1}{M} \sum_n x(n) e^{-j\omega_j n} \right) e^{j\omega_j n} \right) e^{-j\omega_k n} \right|\quad (7)$$

由以上公式，就可以求解多次谐波以及基频分量的具体频率值以及其幅度大小。

2.2 等精度测量法

测频率分为测周法和测频法，分别适用于低频和高频，实际上是通过频率低的信号作为门信号，计算频率高的信号通过的周期数，以此来计算两个频率的比值，因为其中一个信号频率已知，所以可以得出待测信号的频率。

而上述两种测量方法都有由于相位差带来的误差，因此可以使用等精度测量法，将两个信号的相位对齐后，在经过简单计算即可得到待测信号的频率，当然这种方法也可以用来进行占空比的计算，本系统时域分析方波信号的波形，利用该方法实现占空比的测量。

设计报告样例- 分析与计算

2.3 舵机驱动原理

舵机是一种位置或角度伺服的驱动器，可以使用 MCU 发送 PWM 来控制舵机调节其转角，发送 50Hz 的方波，占空比为 2.5% 时，转角为 0° ，占空比为 12.5% 时，转角为 180° ，分别控制舵机的横向角和纵向角就可以实现 XY 轴的绘制。

本系统绘制 MCU 的 ADC 采集波形，利用距离与角度的关系，根据已有波形的数据，即为 x ，有：

$$\theta = \arctan\left(\frac{x}{L}\right) \quad (8)$$

根据此公式即可获知需要转动角度的多少。

设计报告样例- 电路与程序设计

三、电路与程序设计

3.1 电路设计

为了使整体电路更加美观,不受噪声影响,且不互相干扰,进行了以下处理:

- 1) 由于低频信号的周期较长,电容会存在一定的放电现象,所以我们通过改善电容和电阻的大小,将时间常数增大,将方波低频特性改善。
- 2) 由于高频信号和高幅值信号有较大的超调量,可以通过减小电阻值一定程度

上抑制超调量的出现,实际上是调节了阻尼系数。

3.1.1 调理电路模块

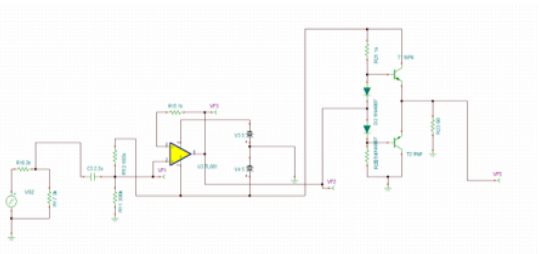


图3 调理电路

该调理电路由电阻分压网络,电压跟随器和甲乙类互补推挽功率放大电路组成,由于频率不高,没有使用T型衰减器,而功率放大电路是为了提高带载能力,ADC的输入阻抗较低,负载较重。

3.2 程序设计

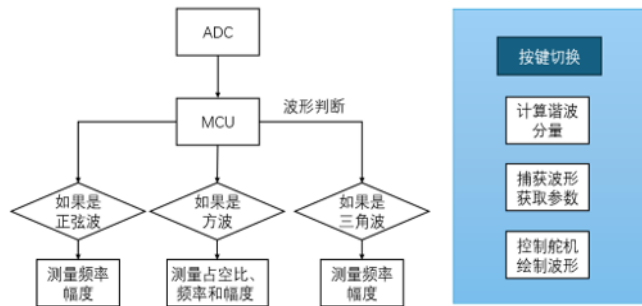


图4 MCU 流程图

程序设计使用基于相位解调的频率估计计算频率,使用等精度法计算占空比,同时对于幅度,则是使用估计精准频率的值进行傅里叶变换,继而得到相应幅度值,谐波也是使用的类似方法。

捕获波形使用TI MCU内部的比较器,使用窗口比较进行触发,从而捕获瞬时的单周期信号,能够测量最大幅度值以及持续时间。

控制舵机绘制波形则是直接利用PWM波改变占空比,利用反双曲函数的近似线性区来进行图形绘制,最终能得到较为完整的波形。

设计报告样例- 测试方案与结果

四、测量方案与测试结果

4.1 测试方案

为了测试系统的完备性，我们选取不同调制信号的波形和频率，分别测试频率、最大最小值、占空比、猝发信号时长等的功能，利用示波器观察波形，用[双踪示波法](#)验证了实现的整体效果，能够满足要求，且提供了更广的范围。

4.3 测试结果及分析

1) 测试结果

表 2 最大值与最小值测量结果

最大值实际值 (V)	0.256	0.497	1.012	1.511	1.998	2.478
最小值实际值 (V)	-0.246	0.530	-0.990	-1.499	-2.03	-2.533
最大值理论值 (V)	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5
最小值理论值 (V)	-0.25	-0.5	-1	-1.5	-2	-2.5
相对误差	0.02	0.033	0.011	0.004	0.008	0.011

2) 测试分析与结论

根据上述测试数据，可以得出以下结论：

1、本装置可以测量方波、正弦波、三角波的幅度、频率以及方波的占空比，还可以测量自定义波形的各次谐波幅度和频率，同时，可以捕捉单周期方波，并将其持续时间和最大幅度准确测量，但是在单周期方波波形上存在一定的误差。

2、另外，本装置在题目要求基础上，进一步拓宽了测量精度，能够实现更精密的测量。

表 3 频率测量结果

频率 (kHz)	0.1	0.5	1	2	5	10
实际频率 (kHz)	0.1005	0.5001	1.003	2.001	5.001	10.03
相对误差	0.005	0.0002	0.003	0.0005	0.0002	0.003

表 4 方波占空比测量结果

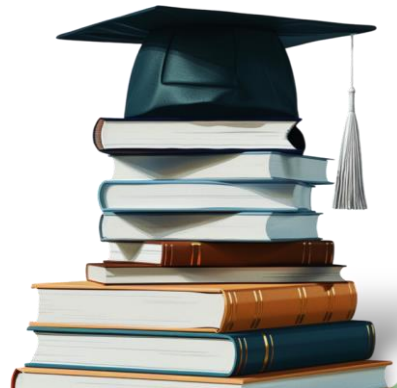
理论占空比	10	20	30	40	70	90
实际占空比	11.0	20.3	31.2	38.5	69.5	89.8
相对误差	0.100	0.015	0.040	0.038	0.007	0.002

表 5 谐波频率测量结果

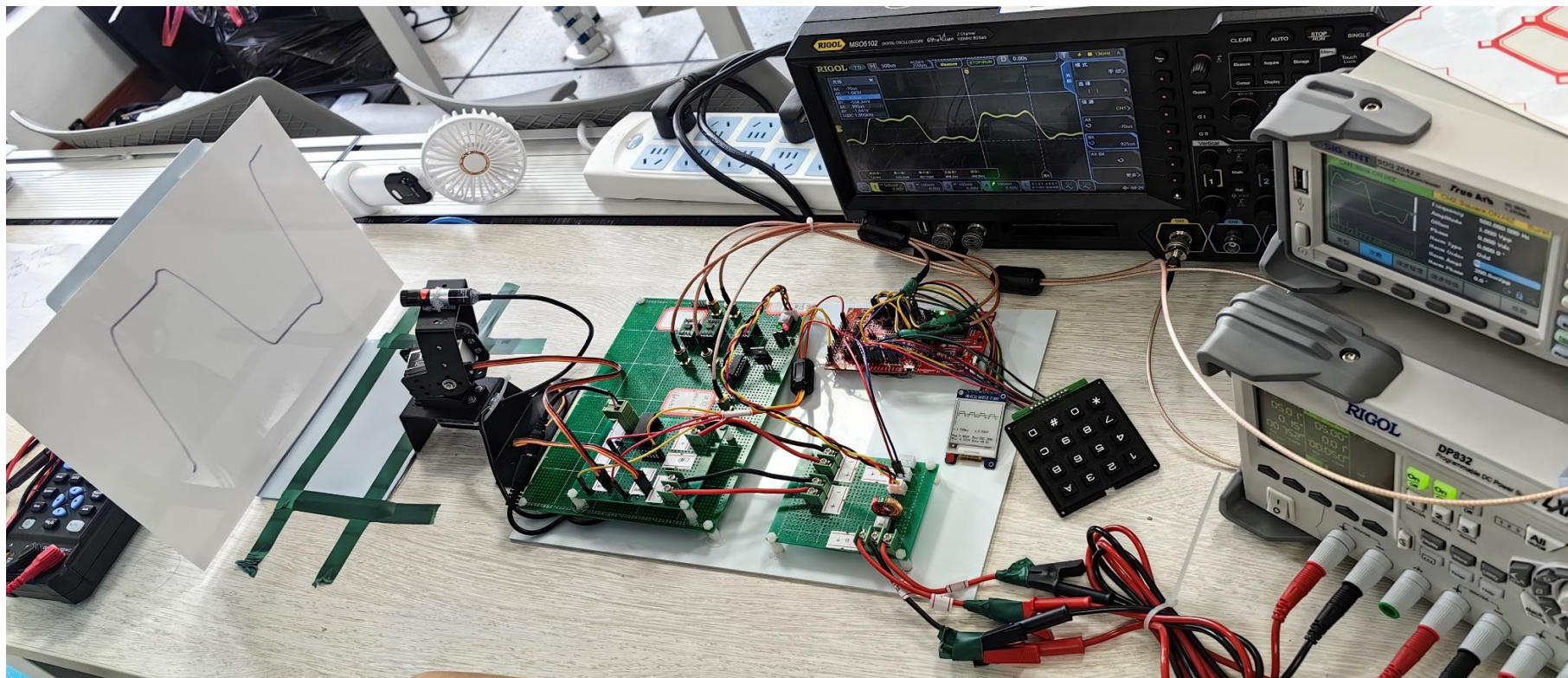
谐波阶数	1	2	3	4	5
实际幅度 (V)	0.9322	0.9072	0.8879	0.01466	0.00238
理论幅度 (V)	1	1	1	0	0

05

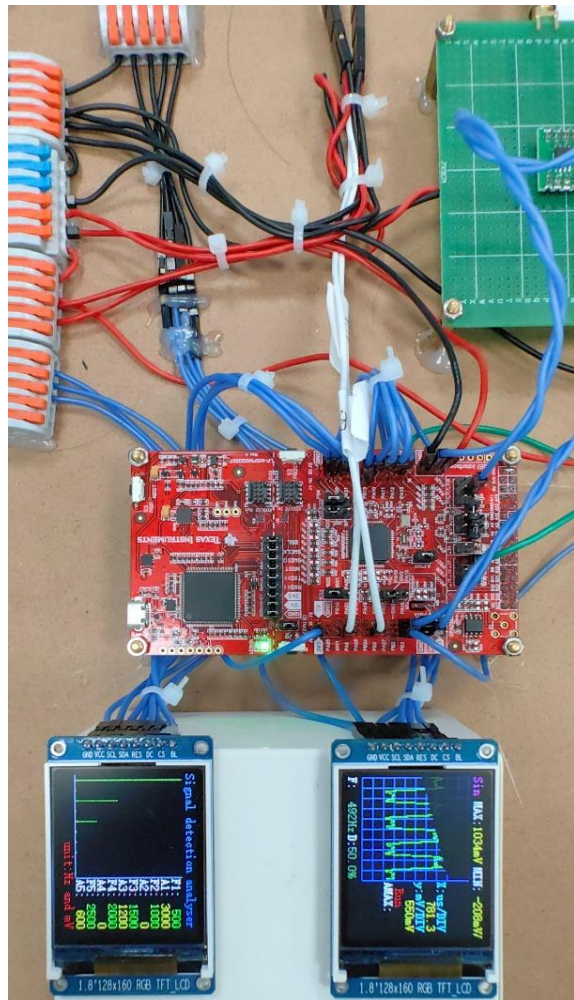
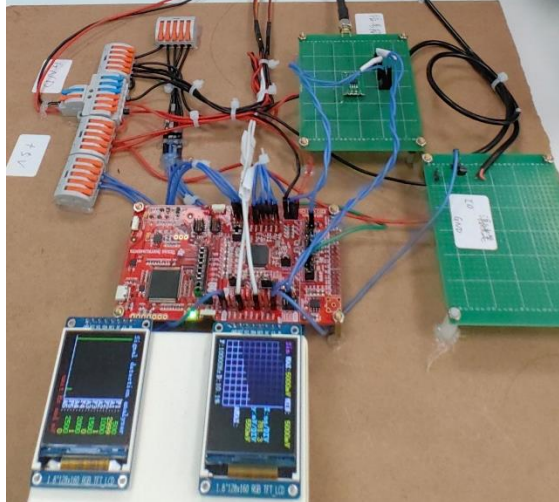
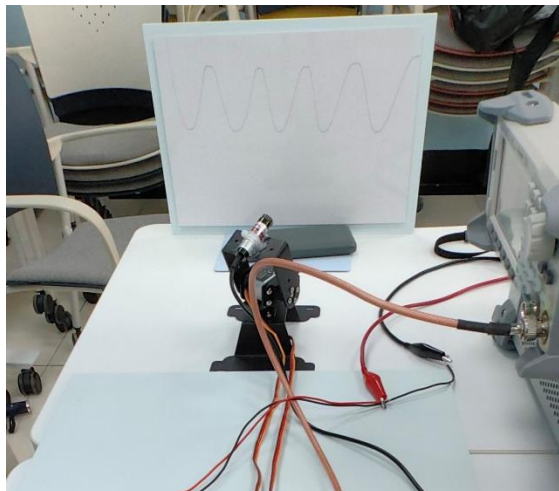
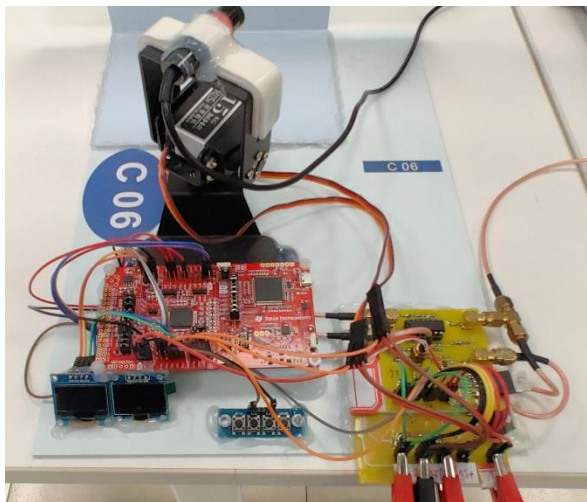
作品介绍



优秀作品展示



优秀作品展示



优秀作品展示



06

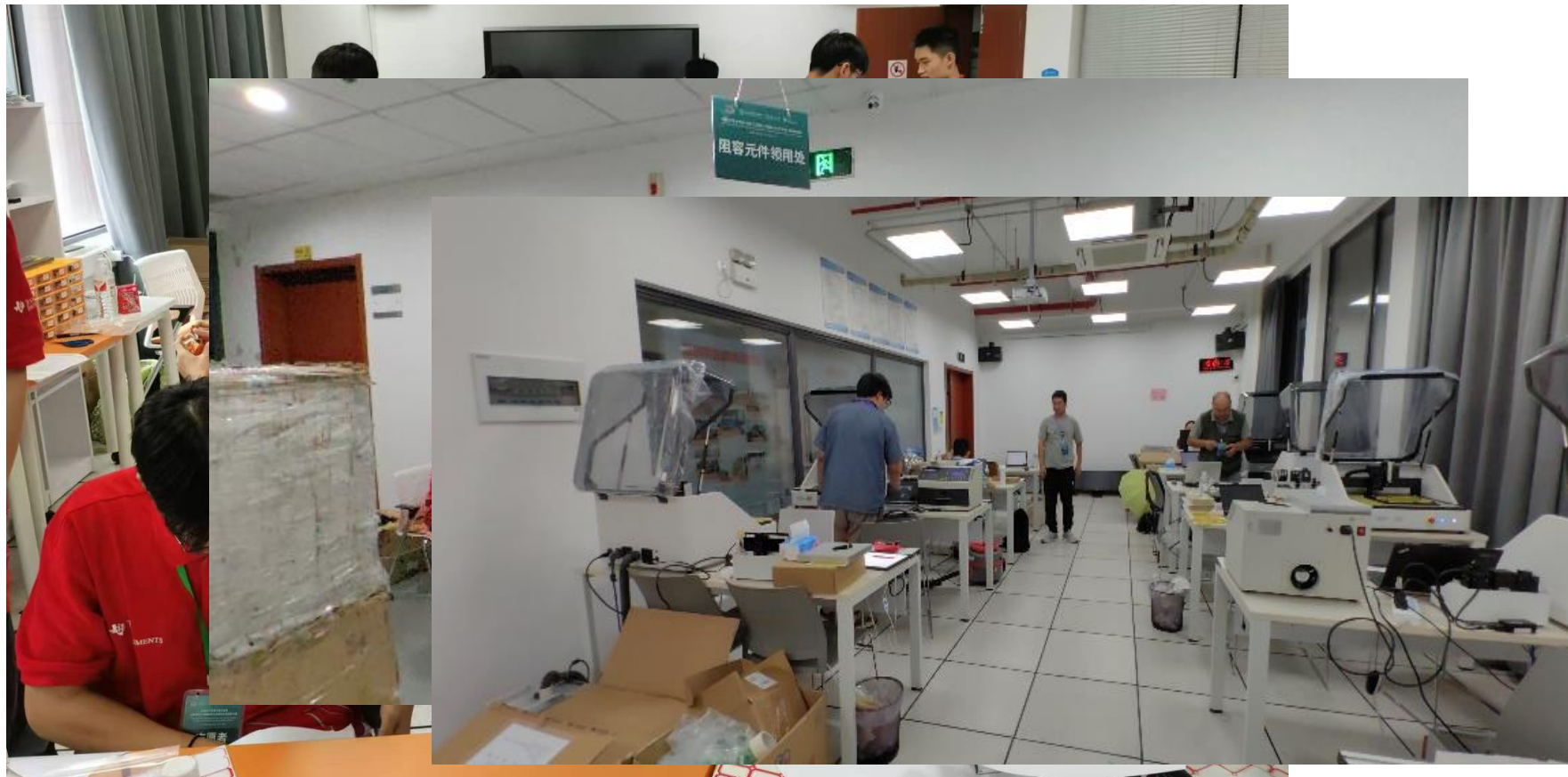
竞赛环境



竞赛现场环境



竞赛现场环境



感谢观看!

