

## 信号失真度测量装置

**摘要：**本系统设计了一个以 MSP432d 系列微控制器为主控的信号失真度测量装置，可以测量输入信号的总谐波失真  $THD$ ，并实现在手机上远程显示等功能。测量装置由信号调理电路和信号测量电路两部分组成。信号发生器输出的信号经过信号调理电路调理后由 MCU 片内 ADC 采集，采集后利用快速傅里叶变换分析输入信号的频谱特征，计算  $THD$  并通过显示屏和手机显示。通过测试，本系统能正确测量并显示输入信号失真度、周期波形、基波与谐波归一化幅值，失真度误差绝对值小于3%。失真度测量与显示用时小于3秒。

**关键词：**失真度测量；快速傅里叶变换；MSP432

## 一、 系统方案

### 1. 比较与选择

#### 1.1 上位机通信方案

方案一：采用蓝牙传输信息

方案二：采用 Wi-Fi 传输信息

方案选择：方案一，蓝牙覆盖范围较小，半径约为 15m，功耗较低；方案二，Wi-Fi 传输速度较高，可以达到 11Mbps，有效半径可达 150m，但功耗较高。综合考虑，使用方案二。

#### 1.2 FFT 窗函数选择方案

方案一：三角窗

方案二：汉宁窗

方案选择：方案一，三角窗与矩形窗比较，主瓣宽约为两倍，旁瓣小，而且无负旁瓣，适合分析窄带信号；方案二，汉宁窗可以看作 3 个矩形窗的频谱平移后相叠加，主瓣较宽旁瓣较小，可消去高频干扰并减小能量泄漏。综合考虑本题实际情况，使用方案二。

#### 1.3 信号调理电路方案

方案一：采用 PGA 对输入信号进行调理

方案二：采用 VGA 对输入信号进行调理

方案选择：方案一，PGA 增益稳定，易于控制与计算，但带宽和压摆率普遍不高，易引入失真；方案二，VGA 增益可灵活控制，再通过级联固定增益放大器可获得较大增益范围，但高频时易自激。综合考虑本题测量需求，使用方案二。

### 2. 方案描述

系统框图如图 1 所示。系统主控制器采用 MSP432 系列 MCU，其搭载了一个 ARM Cortex-M4F 低功耗处理器，测量参数通过串口屏显示。单片机控制定时器输出一路 PWM 信号，经低通滤波后作为 VGA 增益控制信号。信号发生器的输出信号经过 VGA 放大调理后由处理器片内高精度 ADC 采样。CPU 控制 DMA 读取 ADC 转换后数据至内存以获得稳定的采样率，之后经 FFT 算法得到频谱并计算 *THD*。MCU 将 *THD*、单周期波形、基波与谐波归一化幅值等信息进行压缩编码，通过两路串口分别与串口屏和 ESP8266 通信，ESP8266 通过 Wi-Fi 与上位机通信，最后将结果显示在手机上。

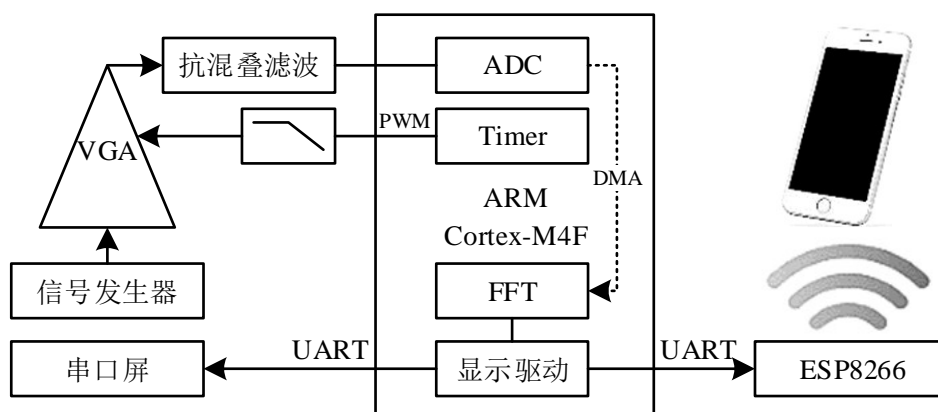


图 1 系统框图

## 二、理论分析与计算

### 1. 测量原理分析计算

#### 1.1 总谐波失真计算原理

设出现谐波失真的放大器输出交流电压为  $u_0 = U_{01}\cos(\omega t + \varphi_1) + U_{02}\cos(2\omega t + \varphi_2) + U_{03}\cos(3\omega t + \varphi_3) + \dots$ ，则  $u_0$  的总谐波失真定义为

$$THD = \frac{\sqrt{U_{02}^2 + U_{03}^2 + U_{04}^2 + \dots}}{U_{01}} \times 100\% \quad (1)$$

本题采用近似式

$$THD = \frac{\sqrt{U_{02}^2 + U_{03}^2 + U_{04}^2 + U_{05}^2}}{U_{01}} \times 100\% \quad (2)$$

#### 1.2 信号幅频分析原理

可以利用傅里叶变换计算各谐波分量的幅值，DFT 计算公式如下：

$$X[2m] = \sum_{n=0}^{N/2-1} (x[n] + x[n + N/2]) \omega_{N/2}^{mn} \quad (3)$$

$$X[2m + 1] = \sum_{n=0}^{N/2-1} (x[n] + x[n + N/2]) \omega_N^n \omega_{N/2}^{mn} \quad (4)$$

在计算时利用快速傅里叶变换算法进行计算，为得到较高频率分辨率并减小频谱泄漏的影响，在采样后对信号加汉宁窗，窗函数如下：

$$\omega[n] = \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \theta \left( 2\pi \frac{n}{N-1} \right) \right], \quad n \in \left[ -\frac{N-1}{2}, \frac{N-1}{2} \right] \quad (5)$$

考虑到 ADC 的缓冲区上限，选择 1024 点的快速傅里叶变换。由于待测信号的基波频率范围较大，系统采用动态确定采样率的方法并进行抗混叠滤波器切换，根据谐波能量的

泄漏范围在功率谱求得各次谐波功率，最后根据式(2)计算  $THD$ 。

## 2. 误差分析

### 2.1 频谱混叠与频谱泄漏

为了提高频谱分析精度，需要进行采样率变换。升采样和降采样会导致高次谐波混叠进奈奎斯特频带，对  $THD$  的计算带来误差。同时由于很难采到整数个周期，FFT 会导致频谱泄漏。频谱混叠与频谱泄漏均会导致谐波功率测量的误差，进而影响  $THD$  的测量，可通过抗混叠滤波器与加合适的窗函数来减小误差。

### 2.2 信号调理电路

信号调理电路会引入非线性失真。运放自身的总谐波失真和压摆率不足均会引起非线性失真，同时抗混叠滤波器的带内纹波也会导致信号的频率分量发生变化。故应当选择超低失真、压摆率满足要求的运放进行放大和滤波，且滤波器的通带应足够平坦。

## 三、 电路与程序设计

### 1. 信号调理电路设计

信号调理电路如图 3 所示。由于输入信号幅值为  $30\text{mV}\sim 600\text{mV}$ ，为了提高测量精度，由可控增益放大器对输入信号实现分档放大。可控增益放大器由 AD8367 实现，其带宽较高，可实现  $-2.5\text{dB}\sim 42.5\text{dB}$  增益控制放大，放大信号由 MSP432 的片内 ADC 采集，并由 MSP432 输出 PWM 波，经过低通滤波器输出电压范围为  $0\sim 1\text{V}$  的直流电压到实现增益控制；前级由电阻网络实现  $200\Omega$  阻抗匹配，并由 OPA365 搭建的同相放大电路实现增益补偿，并由低压差线性稳压器 AMS1117 和电阻分压添加  $1.65\text{V}$  直流偏置使输出信号适应 ADC 输入范围，OPA365 是一款低失真轨至轨高性能运算放大器，总谐波失真低至  $0.0004\%$ ，带宽为  $50\text{MHz}$ ，压摆率为  $25\text{V}/\mu\text{s}$ ，满足需求。

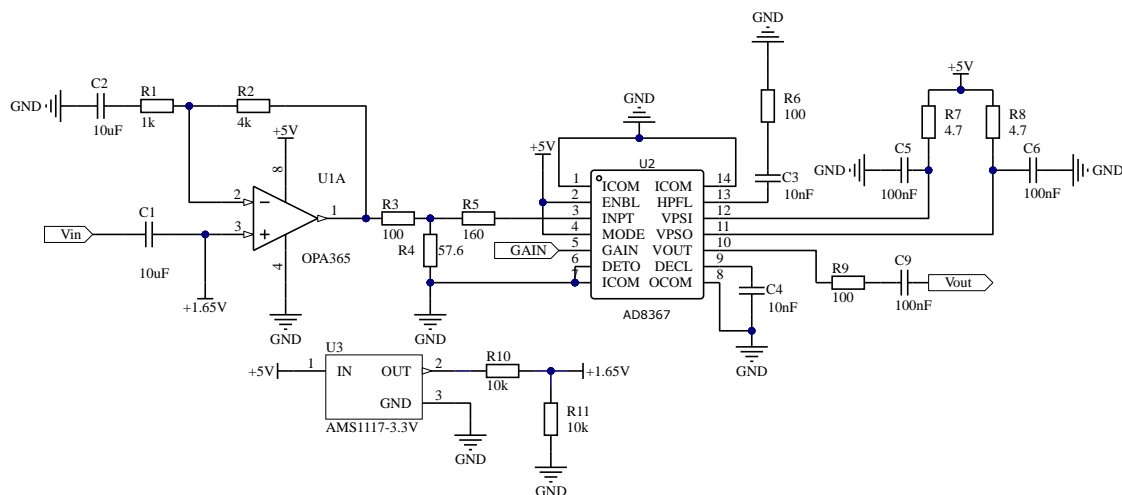


图 3 信号调理电路

## 2. 抗混叠滤波器设计

抗混叠滤波器电路设计如图 4 所示。输入信号经过抗混叠滤波器减小混叠频率分量，再由片内 ADC 采集。由于输入信号频率为1kHz~100kHz，带宽较大，片内 ADC 分200kHz和1MHz两档采样率，相应需要通过继电器控制截止频率不同的两档抗混叠滤波器，抗混叠滤波器由三阶有源低通巴特沃斯滤波器构成，截止频率分别为100kHz和500kHz，带内平坦。

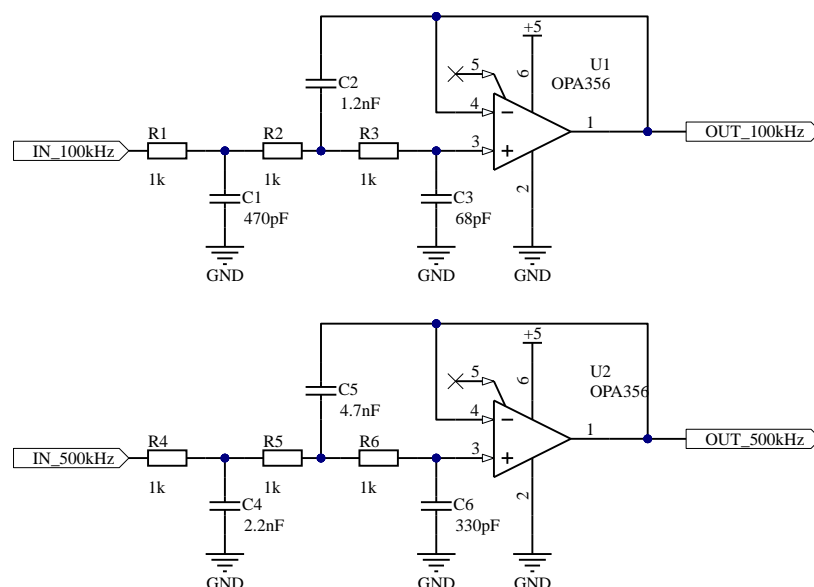


图 4 抗混叠滤波器电路

## 3. 程序设计

程序设计流程图如图 5 所示。通过按键实现测量进程的开启。开始测量后，对系统进行初始化，ADC 采集输入信号，根据输入信号峰峰值动态切换增益。一档为600mV以上，做信号跟随处理；第二档为200mV~600mV，放大 5 倍；第三档为200mV以下，放大 15 倍。为防止切换阈值频繁触发，采用迟滞方式切换档位。单片机根据档位输出带有增益信息的 PWM 信号。片内 ADC 首先采用1MHz采样率得到信号频率的粗略范围，根据粗测频率调整 ADC 采样率，使得频谱中的基频位于可测频带的较远位置，进而得到更精确的频率。根据频率选择合适的采样率和抗混叠滤波器。采集信号后，对信号进行快速傅里叶变换计算频谱信息，根据频谱计算 *THD*。最后通过串口屏显示测量结果，并将数据进行压缩编码后发送给 ESP8266 协处理器，采用 UDP 协议通过 Wi-Fi 发送至移动端，移动端将数据解码后显示测量结果。

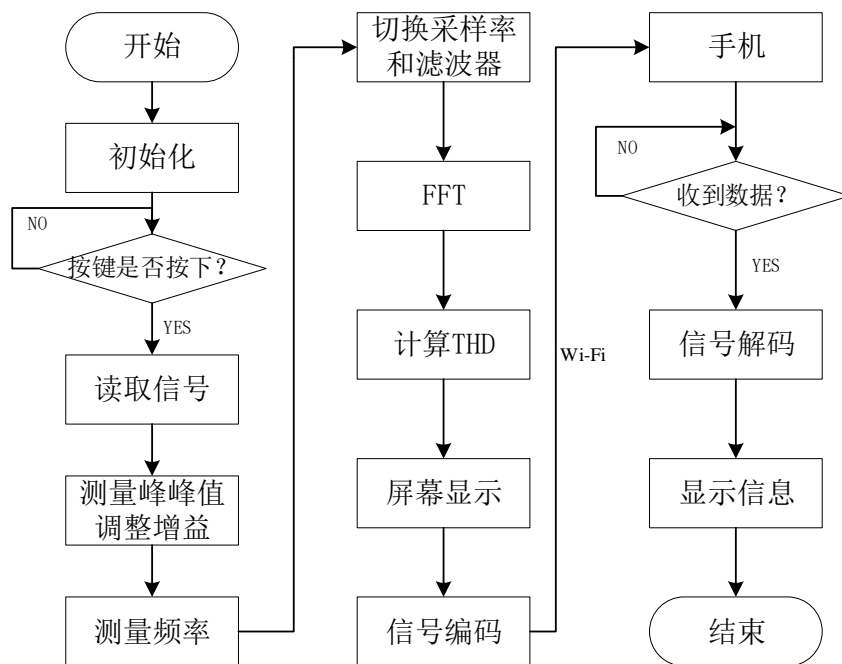


图 5 程序设计流程图

## 四、 测试方案与测试结果

### 1. 测试环境

示波器： Tektronix MSO2002B 型数字示波器；  
 信号发生器： RIGOL DG1062 型 60M 任意波形发生器；  
 电 源： Panasonic NCR18650B MH12210 圆柱形锂离子电池。

### 2. 测试方案

#### 2.1 失真度测量误差绝对值测试方案

选择不同频率和失真度的信号，在峰峰值 30mV、150mV、600mV 情况下分别测量失真度并取平均值，与信号发生器输出信号的理论失真度进行对比，计算测量误差绝对值并记录。

#### 2.2 基波与谐波归一化幅值测试方案

选择三组失真度在 3%~50% 的谐波合成信号，分别在 1kHz、10kHz、100kHz 频点用函数发生器输出，计算周期函数傅里叶变换得到理论的归一化幅值，与装置测量值进行比较并记录。

#### 2.3 测量与显示用时测试方案

随机选择五组不同频率、失真度、幅度的输入信号，一键启动测量后用秒表测量用时，每组进行 3 次用时测试并取平均值记录。

3. 测试结果与数据

3.1 信号失真度测量误差绝对值测试

表 1 信号失真度测量误差绝对值测试表

输入信号频率	波形	$THD_o$	$THD_x$	测量误差绝对值
1kHz	三角波	11.27%	11.73%	0.46%
10kHz	三角波	11.27%	11.82%	0.55%
100kHz	三角波	11.27%	11.65%	0.38%
1kHz	方波	37.33%	39.44%	2.11%
10kHz	方波	37.33%	38.97%	1.64%
100kHz	方波	37.33%	38.73%	1.40%
1kHz	谐波合成	50.00%	50.01%	0.01%
10kHz	谐波合成	50.00%	49.97%	0.03%
100kHz	谐波合成	50.00%	51.02%	1.02%

3.2 输入信号基波与谐波的归一化幅值测试

用函数发生器输出 6 组谐波信号模拟被测信号进行测试，输入信号基波与谐波的归一化幅值如下表所示。

表 2 输入信号基波与谐波的归一化幅值测试组（理论值）

输入信号频率	基波	二次谐波	三次谐波	四次谐波	五次谐波
1kHz	1	0.02	0.03	0.01	0.02
10kHz	1	0.02	0.03	0.01	0.02
100kHz	1	0.02	0.03	0.01	0.02
1kHz	1	0.15	0.18	0.14	0.19
10kHz	1	0.15	0.18	0.14	0.19
100kHz	1	0.15	0.18	0.14	0.19
1kHz	1	0.25	0.23	0.24	0.22
10kHz	1	0.25	0.23	0.24	0.22
100kHz	1	0.25	0.23	0.24	0.22

测试装置显示 6 组输入信号基波与谐波的归一化幅值结果如下表所示。

表 3 输入信号基波与谐波的归一化幅值测试表（测量值）

输入信号频率	基波	二次谐波	三次谐波	四次谐波	五次谐波
1kHz	1	0.02	0.03	0.01	0.02
10kHz	1	0.02	0.04	0.01	0.02
100kHz	1	0.03	0.03	0.01	0.03
1kHz	1	0.14	0.17	0.14	0.20
10kHz	1	0.15	0.17	0.14	0.20
100kHz	1	0.15	0.18	0.14	0.21
1kHz	1	0.25	0.23	0.24	0.22
10kHz	1	0.26	0.23	0.24	0.22
100kHz	1	0.26	0.23	0.25	0.23

### 3.3 测量与显示用时测试

表 4 测量与显示用时测试表

测量次数	时间
1	3s
2	2s
3	2s
4	3s
5	3s

## 4. 测试结果分析

4.1 信号失真度测量误差绝对值测试分析：由数据结果知，信号失真度测量误差绝对值小于 3%，满足题目要求。误差主要来源于 ADC 和运放引入的谐波失真，频谱泄露问题。

4.2 输入信号基波与谐波的归一化幅值测试分析：由数据结果知，输入信号基波与谐波的归一化幅值的测量误差小于 1%，满足题目要求。

4.3 测量与显示用时测试分析：由数据结果知，测量与显示平均用时在 2.6s 左右，满足题目要求。

## 五、 参考文献



- [1]. 罗杰,谢自美.电子线路-设计·实验·测试(第五版),2015,电子工业出版社.
- [2]. 康华光.电子技术基础(模拟部分)(第六版),2013,高等教育出版社.
- [3]. [美]Bruce Carter.运算放大器权威指南(第四版),2014,人民邮电出版社.
- [4]. 王贞炎.电子系统设计——基础与测量仪器篇,2021,电子工业出版社.
- [5]. 黄智伟.全国大学生电子设计竞赛——常用模块制作,2011,北京航空航天大学出版社.
- [6]. 电子测量与仪器(第3版).陈尚松等编.电子工业出版社,2014
- [7]. 谭扬波,徐向明等.一种提高非线性器件测试精度的算法,1998