

信号失真度测量装置

摘要：本设计实现的信号失真度测量装置，可以对来自函数/任意波形发生器的周期信号进行采集分析，测得输入信号的总谐波失真 THD，并可在手机上显示测量信息。系统硬件部分由前级调理电路、单片机 STM32H743VIT6、HC-06 蓝牙模块等部分组成；软件部分由手机端上位机和单片机端下位机两部分组成。经过测试，此装置可在启动测试后 1s 内完成测量与显示，其中输入信号允许电压峰峰值范围 2mV~600mV，基频 1kHz~100kHz，THD 测量的误差不超过 1%。

关键词：THD 测量；ADC 采样；FFT

一、 系统方案

1. 比较与选择

1.1 前级调理设计方案

方案一：由纯硬件构成 AGC 自动增益放大电路。

方案二：由运放构成多个挡位的放大电路，每路的输出单独接入单片机的 ADC 通道，在单片机内使用软件切换 ADC 通道进行测量。

方案选择：方案一，硬件设计较为复杂且成本较高；方案二，使用较简单的硬件就能够满足 ADC 采样的需求。综合考虑，使用方案二。

1.2 手机端上位机方案

方案一：利用 Android Studio 设计手机应用程序。

方案二：利用蓝牙调试器 app 的专业调试功能，按照规定的协议，处理发送数据包和接收数据包，实现控制信号的发送和接收数据的显示。

方案选择：方案一，设计较为复杂，耗时较长；方案二，直接使用 app，只需统一协议就能实现蓝牙通信，方便快捷。综合考虑，使用方案二。

2. 方案描述

系统框图如图 1 所示。首先让输入信号经过前级调理电路，接着用 STM32 的片内 ADC 采集，然后对采集数据进行处理和计算，最后在串口屏和手机上显示 THD 值、单周期波形、基波与谐波的归一化幅值等内容。

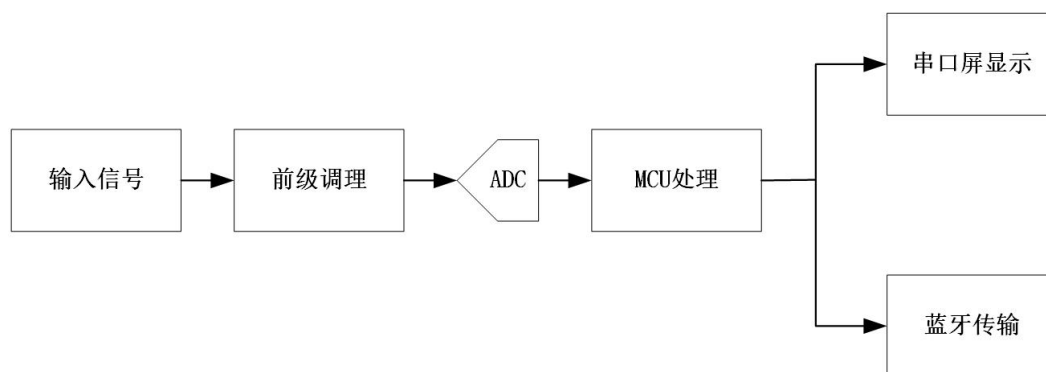


图 1 系统框图

二、 理论分析与计算

1. 放大器的非线性失真

放大器内部基本换能器件是晶体管，具有非线性特性，当输入信号经过放大电路时，输出信号与输入信号存在着畸变，即发生了非线性失真，非线性失真会破坏信号的原始波

形，导致输出信号与输入信号之间产生额外的频率成分和谐波。

2. 谐波失真

当放大器输入为正弦信号时，放大器的非线性失真表现为输出信号中出现谐波分量，即出现谐波失真，通常用“总谐波失真 THD (total harmonic distortion)”定量分析放大器的非线性失真程度。本题中的输入信号即为这个谐波分量，使用函数发生器来模拟这个周期性谐波信号的发生，在调试过程中可以改变谐波的幅度和频率。

3. 总谐波失真 THD

若放大器的输入交流电压为 $u_i = U_i \cos \omega t$ ，出现谐波失真的放大器输出交流电压为

$u_o = U_{o1} \cos(\omega t + \varphi_1) + U_{o2} \cos(\omega t + \varphi_2) + U_{o3} \cos(\omega t + \varphi_3) + \dots$ ，则的总谐波失真（失真度）定义为

$$THD = \frac{\sqrt{U_{o2}^2 + U_{o3}^2 + U_{o4}^2 + \dots}}{U_{o1}} \times 100\%$$

本题信号失真度测量采用近似方式，测量和分析输入信号谐波成分时，只处理到 5 次谐波，定义

$$THD_o = \frac{\sqrt{U_{o2}^2 + U_{o3}^2 + U_{o4}^2 + U_{o5}^2}}{U_{o1}} \times 100\%$$

为本题失真度的标称值，则失真度测量的误差绝对值为

$$\Delta = |THD_x - YHD_o|$$

4. 基波与谐波的归一化幅值

当输入信号的基波幅值为 U_{m1} ，各次谐波幅值分别为 U_{m2} 、 U_{m3} ...，基波与谐波的归一化幅值为：1、 (U_{m2}/U_{m1}) 、 (U_{m3}/U_{m1}) ...。

5. 奈奎斯特采样定理

为了完整地保留原始信号中的信息，采样频率必须至少为信号最高频率的两倍。这一采样率条件确保了信号在离散化过程中不会发生混叠现象。在实际应用中，通常会选择比信号最高频率高 5~10 倍的采样频率，以提供一定的安全余量。

本题输入信号基频范围为 1kHz~100kHz，最高基频 100kHz，其五次谐波为 500kHz，因此 ADC 的采样率至少为 1MHz。

6. ADC 信号调理电路

STM32 的 ADC 为 16 位，AD 值取值范围为 0~65535，采集电压范围为 0 到 3.3V，同时要在保证 ADC 能够充分采样，因此在进行信号采集之前需要对输入信号进行前级调理，包括对将小幅值的信号放大合适倍数，控制峰峰值在 3.3V 以内的合适值，还要对整体信号进行抬升处理，确保负电压部分抬升至 0V 以上。

根据本题情况，将 30-600mV 的输入信号分成三档分别放大不同倍数，再给放大后的电压提供 1.65V 的偏置，便于 ADC 采集。

7.FFT 算法：

FFT 是一种高效实现 DFT 的算法，称为快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform, FFT）。

傅里叶变换在时域和频域上都呈离散的形式，将信号的时域采样变换为其 DTFT（discrete-time Fourier transform）的频域采样。

假设采样频率为 F_s ，信号频率 F ，采样点数为 N 。那么 FFT 之后结果就是一个为 N 点的复数。每一个点就对应着一个频率点。这个点的模值，就是该频率值下的幅度特性。同时，FFT 后的 N 个点，开始的那个点表示直流分量（即 0Hz），而最后的那个点的再下一个点表示采样频率 F_s ，这中间被 $N-1$ 个点平均分成 N 等份，每个点的频率依次增加。即，某点 n 所表示的频率为：

$$F_n = (n - 1) \cdot \frac{F_s}{N}$$

三、 电路与程序设计

1. 偏压提供电路设计

偏压提供电路如图 3 所示。

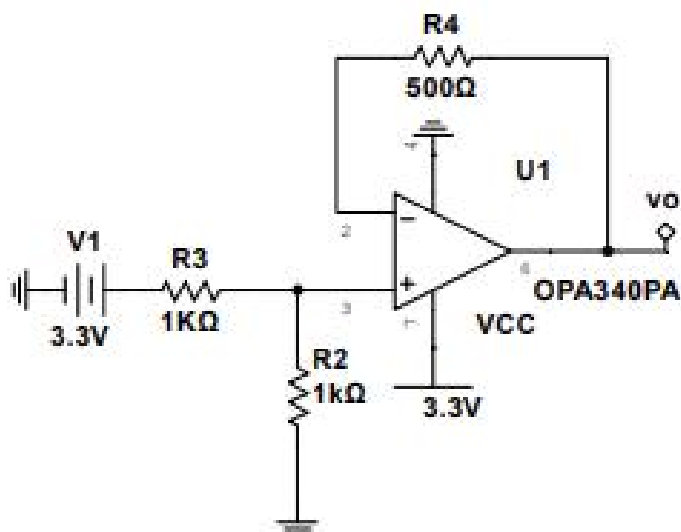


图 2 偏置提供电路

取 3.3V 的中值，将输入信号的电压抬升 1.65V。

2. 放大电路设计

本题输入信号的幅值范围为 30mV 到 600mV，分成以下三档分别进行放大。

表 1 幅值分档放大表

30mV 以下	放大 80 倍
30mV 到 100mV	放大 20 倍
100mV 到 600mV	放大 5 倍

以下以放大 5 倍为例，当输入信号峰峰值为 600mV 时，输出峰峰值为 3V 且中值为 1.65V 的信号，进入后级的信号采集。放大电路设计如图 3 所示。

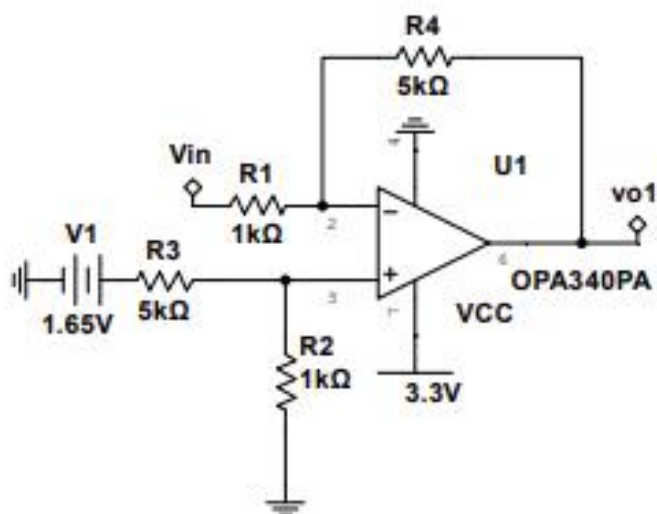


图 3 反相放大电路

放大 20 倍将 R3 和 R4 的值更换为 20K Ω 即可。
放大 80 倍将 R3 和 R4 的值更换为 80K Ω 即可。

3. 软件程序设计

程序设计流程图如图 x 所示。

STM32H7VIT6 作为主控制器，接收来自按键、串口屏或手机发送的开启测试信号后，开启 ADC1 的采样。接着求信号的峰峰值，用于判断当前放大倍数是否合适，以及控制是否切换其他 ADC 通道。再接着对采样数据加窗（汉宁窗）后进行 FFT，得到频谱图。然后分析频谱图，得到基波和各次谐波的幅值，计算 THD 和归一化幅值。最后送到串口屏显示和用蓝牙送到手机显示。

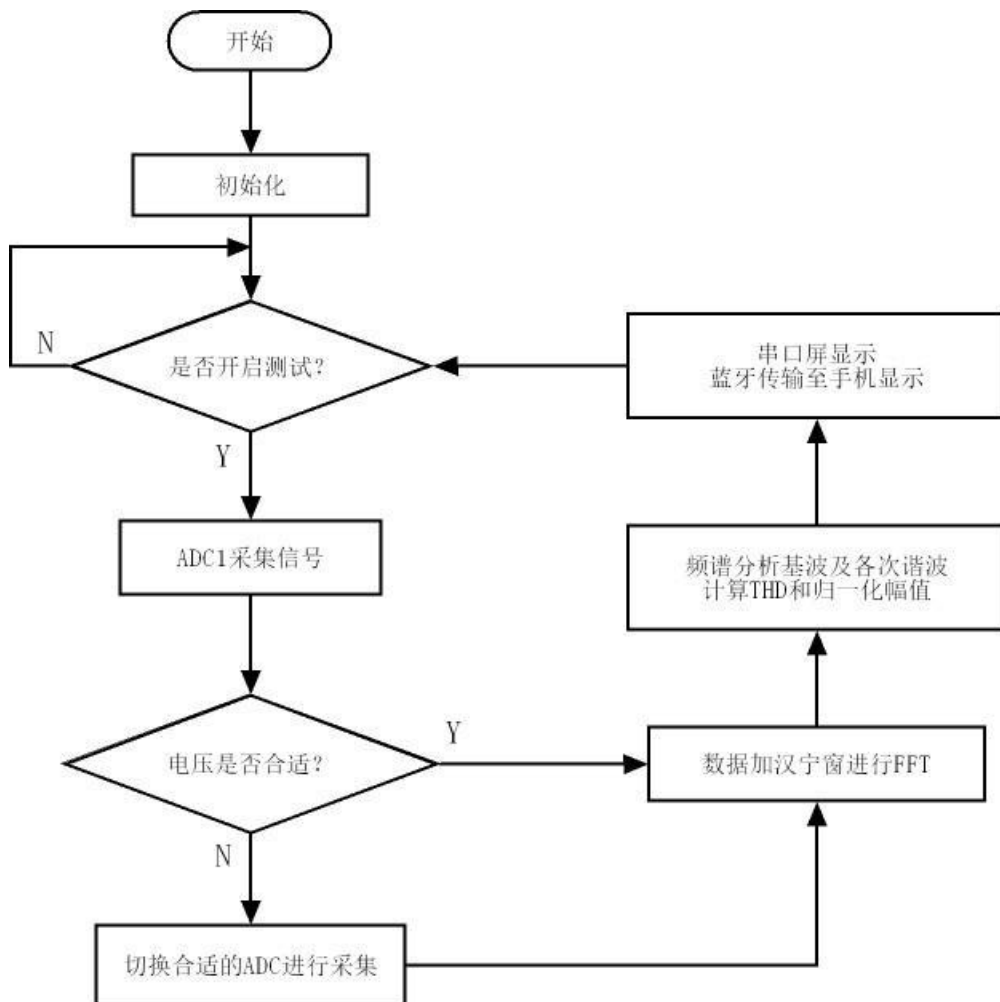


图 4 程序设计流程图

四、 测试方案与测试结果

1. 测试环境

示波器： Tektronix MDO2002B 型数字示波器；

信号发生器： RIGOL DG4162 型 160M 任意波形发生器；
电 源： ZhongCe DF1743003C 型稳压源。

2. 测试方案

2.1 THD 测试方案

2.1.1 用信号发生器产生相应的待测信号，接到前级调理电路的输入端。

2.1.2 启动测试，观察串口屏上测量的 THD 值、基波与谐波的归一化幅值、输入信号一个周期的波形。

2.2 手机显示测试方案

2.2.1 打开手机 app 并连接上使用的 HC-06 蓝牙模块，进入测量界面。

2.2.2 启动测试，观察手机上测量的 THD 值、基波与谐波的归一化幅值、输入信号一个周期的波形。

3. 测试结果与数据

3.1 THD 测试

表 2 THD 测试表

编号	待测信号		理论失真度	实测失真度	绝对误差	测量的归一化幅值
	基频	幅值				
1	1k	基波： 600mV 三次： 300mV	50.00%	49.7%	0.3%	基波： 1.000 三次： 0.497
2	1k	基波： 300mV 二次： 15mV	5.00%	5.3%	0.3%	基波： 1.000 二次： 0.052
3	1k	基波： 600mV 三次： 50mV 五次： 120mV	21.67%	20.8%	0.87%	基波： 1.000 三次： 0.079 五次： 0.192
4	1k	基波： 2mV 三次： 0.7mV	35.00%	35.2%	0.2%	基波： 1.000 三次： 0.351

5	100k	基波：400mV 二次：100mV 三次：100mV 四次：100mV 五次：100mV	50.00%	49.2%	0.8%	基波：1.000 二次：0.246 三次：0.253 四次：0.240 五次：0.243
6	100k	基波：30mV 三次：5mV 五次：10mV	37.26%	38.2%	0.94%	基波：1.000 三次：0.169 五次：0.339
7	100k	基波：30mV 三次：5mV 四次：10mV 五次：10mV	50.00%	50.0%	0%	基波：1.000 三次：0.163 四次：0.330 五次：0.337
8	100k	基波：600mV 三次：30mV 四次：80mV	14.24%	14.3%	0.06%	基波：1.000 三次：0.041 四次：0.136

3.2 手机显示测试

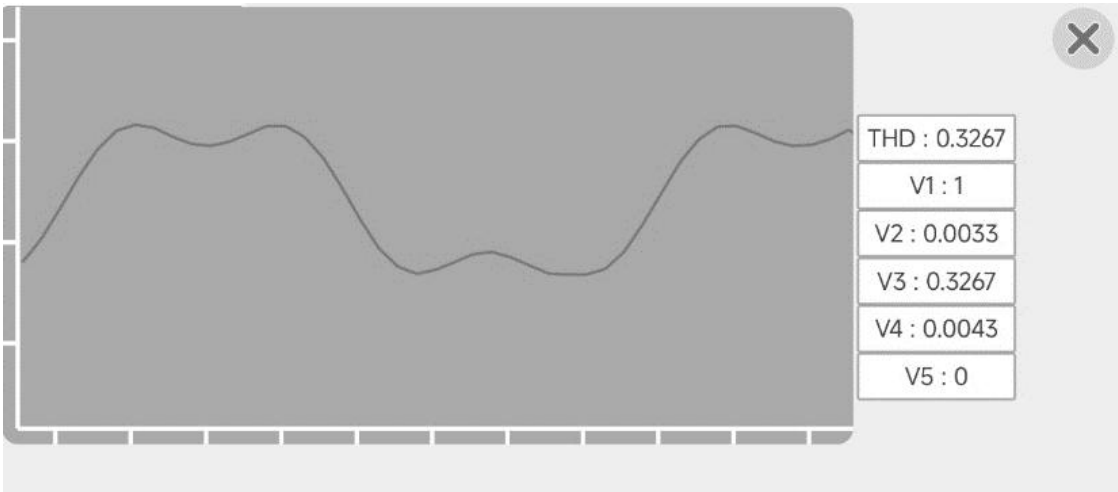


图 5 手机 app 显示图

4. 测试结果分析

4.1 THD 测试分析：由数据结果知，本装置能够在输入信号频率范围 1kHz~100kHz，电压峰峰值范围 2mV~600mV 时，完成总谐波失真 THD 的测量，测量误差绝对值不超过 1%。满足题目要求。误差主要来源于信号的 ADC 采样和 FFT 运算的频谱泄露。

4.2 手机显示测试分析：由显示结果知，手机 app 上能够显示测量装置测得输入信号的 THD 值、一个周期波形、基波与谐波的归一化幅值，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]. 全国大学生电子设计竞赛组委会.第十一届全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编,北京理工大学出版社.