



多种失真信号产生及失真度测量装置的实现

吕 军¹, 罗均毅¹, 吴子山²

(1. 浙江理工大学 信息科学与工程学院, 杭州 310018; 2. 兰州交通大学 电子信息工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对电路中由非线性元件引起的信号失真问题, 设计与实现了一款多种失真信号产生与失真度测量装置。该装置硬件结构由信号产生、信号选择、MCU 控制、本地显示与交互、无线传输和其他辅助电路组成。软件部分利用单片机定时器控制 ADC 采集信号电压, 并开启 DMA 通道提高数据传输速度。通过部署 DSP 库对信号进行 FFT, 测量前 5 次谐波幅值后计算 THD 值。经测试表明: 当输入信号电压峰峰值为 20 mV~3 V, 基波频率为 1~100 kHz 时, 装置可通过本地交互和手机 APP 选择控制输出顶部失真、底部失真、双向失真、交越失真和无明显失真 5 种信号, 对不同类型、不同失真度下的 5 种信号 THD 测量平均绝对误差均小于 0.008。装置响应速度快, 支持人机交互、数据存储与追溯, 为信号失真机制与 THD 测量提供可视化的教学工具, 为新型的信号处理装置开发提供技术参考。

关键词: 总谐波失真; 非线性失真; 信号发生器; 快速傅里叶变换; 远程控制

中图分类号: TN98

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240304

A Device for Generating and Measuring Multiple Distorted Signals

LYU Jun¹, LUO Junyi¹, WU Zishan²

(1. School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Electronic Information and Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To address the issue of signal distortion caused by nonlinear components in circuits, a device capable of generating and measuring multiple types of distorted signals was designed and implemented. The hardware structure of the device consisted of signal generation, signal selection, MCU control, local display and interaction, wireless transmission, and other auxiliary circuits. In the software, a MCU timer was used to control the ADC for signal voltage acquisition, and a DMA channel was enabled to improve data transfer speed. A DSP library was deployed to perform a fast Fourier transform (FFT) on the signal, after which the total harmonic distortion (THD) value was calculated by measuring the amplitudes of the first five harmonics. Test results indicated that for an input signal with a peak-to-peak voltage ranging from 20 mV to 3 V and a fundamental frequency between 1 kHz and 100 kHz, the device could control the output of five types of signals: top distortion, bottom distortion, bidirectional distortion, crossover distortion, and no obvious distortion through local interaction and mobile app. The mean absolute error in THD measurement for all five signal types, across various distortion levels, was found to be less than 0.008. The device has a fast response speed, supports human-machine interaction, data storage and traceability, providing a visual teaching tool for understanding the signal distortion mechanism and THD measurement, and offering a technical reference for the development of novel signal processing devices.

Key words: total harmonic distortion; nonlinear distortion; signal generator; fast Fourier transform; remote control

在模拟放大电路中, 由于非线性元器件(晶体管、三极管)的伏安特性, 导致输出信号波形发生畸变, 即产生了非线性失真现象。为衡量放大电路的失真程度, 通常使用总谐波失真(total harmonic distortion, THD)作为测量参数。THD 反映了信号偏离正弦波的程度, 是反映运算放大器、功率放大器等器件和函数信号发生器等仪器性能的重要指标之一^[1], THD 的测量对信号处理

和谐波分析有着重要意义与广泛应用。

目前, THD 谐波失真度测量主要依靠专用测量设备, 常用测量方法为基波抑制法和频谱分析法^[2]。基波抑制法是分别测量去除基波前后电路的总电压, 采用电压比值来反映 THD 谐波失真度值, 一般适合模拟电路的 THD 测量。频谱分析法是通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对输出信号进行频域分析, 然后通过获取各

收稿日期: 2024-06-05

基金项目: 浙江省高校实验室工作研究项目(ZD202306)。

作者简介: 吕军, 硕士, 高级实验师, 主要从事信号处理方面的教学与研究。E-mail: zstulvjun@126.com

谐波分量的幅值计算 THD 谐波失真度, 该方法适用于数字式 THD 测量。基波抑制法是一种间接测量法, 不能单独测出基波电压的有效值, 基波抑制法测量得到的失真度有别于失真度定义值^[3]。与基波抑制法相比, 频谱分析法虽然针对的是数字信号, 但该方法不仅能准确地测量出数字信号的总失真度值, 还能测量出各次谐波在信号中所占比例, 有利于用户有针对性地减小被测设备的非线性失真^[4]。本装置采用基于 FFT 的频谱分析法对信号失真度进行测量, 可将模拟信号量化为数字信号, 从而直接测量出信号失真度, 搭建了 5 种非线性模拟失真电路进行测试, 开发了本地与远程数据显示终端, 便于波形与参数的显示、存储和历史追溯。

装置具有非线性失真信号产生、THD 自动测量和 THD 远程显示等功能, 非线性失真信号产生与 THD 测量电路有 5 种信号调理电路、单片机数

据处理与控制电路、本地显示电路、无线传输电路、电源转换电路和其他辅助电路等。系统总体设计框图如图 1 所示。

对于同一输入信号, 通过开关控制, 可以产生无失真放大信号、顶部失真信号、底部失真信号、双向失真信号和交越失真信号。采用 STM32 单片机对产生的信号进行采样和 FFT, 获取信号的谐波幅值并计算 THD 值, 通过串口通信和无线通信模块, 将产生信号波形及其 THD 值显示于本地串口屏和远程手机端。在软件处理和显示方面, 通过开启直接访问寄存器 (direct memory access, DMA) 为随机存取存储器 (random access memory, RAM) 与 I/O 采集引脚间开辟一条直接传送数据的通路, 以提高 CPU 使用效率; 在单片机中部署数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 库, 提高数据处理速率; 利用 USART HMI 进行组态设计, 增强交互体验。

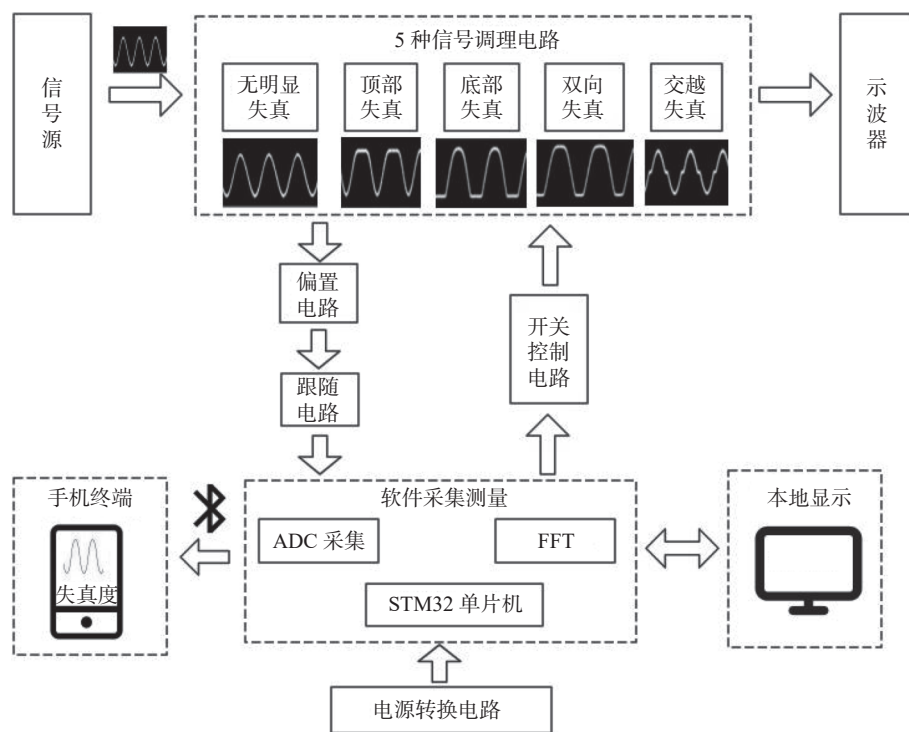


图 1 非线性失真信号产生与失真度测量系统总体设计框图

1 理论分析与计算

1.1 非线性失真信号产生原理

放大电路中常见的非线性失真主要有截止失真、饱和失真、双向失真和交越失真。分析放大电路工作状态, 是实现多种非线性失真信号产生电路设计的前提。

1.1.1 无明显失真和双向失真

集成运算放大器的输出电压 U_o 与输入电压 U_i 的关系曲线称为电压传输特性, 如图 2 所示。当集成运放工作在线性区时, 输出电压与输入电压的差值成线性关系, 即:

$$U_o = A_{vo} (V_{in+} - V_{in-}) \quad (1)$$

式中: V_{in+} 是同向端输入电压, V_{in-} 是反向端输入电压, A_{vo} 是集成运放开环时的差模电压放大倍数, 决定传输特性曲线斜率。运放正常工作在线性放大区, 随着放大倍数提高, 运放会受供电电压的限制, 进入饱和区, 出现双向失真。将运放输出端和反向输入端使用电位器连接, 构成负反馈, 使用不同阻值的增益电位器可将输入电压放大不同的倍数, 进而实现正常范围内和双向失真信号的产生。

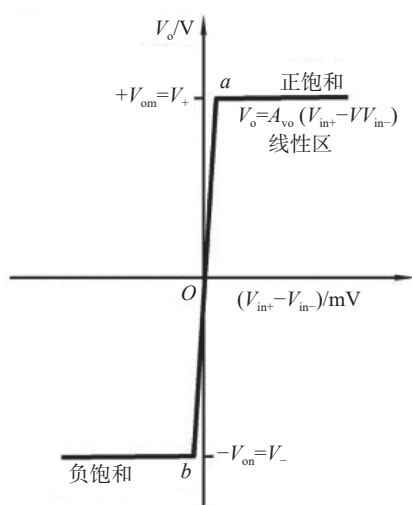


图2 集成运算放大器的电压传输特性曲线图

1.1.2 顶部失真和底部失真

顶部失真和底部失真都是限幅失真。限幅失真与放大器的输出动态范围密切相关, 放大器的输出电压超出线性工作区后就会被限幅, 形成限幅失真。这类失真产生的原因在于静态工作点 Q 设置不当和输出信号较大。放大电路最大不失真输出电压的峰峰值 V_{opp} 为:

$$V_{opp} = 2(V_{CEQ} - V_{CES}) \quad (2)$$

式中: V_{CEQ} 为集电极和发射极之间静态工作点的电压, 由外部偏置决定; V_{CES} 为集电极和发射极之间的饱和压降, 由三极管自身特性决定。当输出电压峰峰值 $V_o \leq V_{opp}$ 时, 晶体管处于正常放大状态, 输出信号无明显失真, 如图3(a)所示; 当输出电压过大, 即 $V_o \geq V_{opp}$ 时, 出现限幅失真。令 $I_{CQ}R'_L$ 为交流负载线和横轴的交点坐标, 当静态工作点设置过低, 即:

$$I_{CQ}R'_L > V_{CEQ} - V_{CES} \quad (3)$$

输出电压峰峰值则受左侧饱和极限值 $V_{CEQ} - V_{CES}$ 限制, 出现底部失真, 如图3(b)所示。反之, 若静态工作点设置过高, 输出电压峰峰值则受右侧截止失真极限值 $I_{CQ}R'_L$ 限制, 出现顶部失真, 如图3(c)所示。

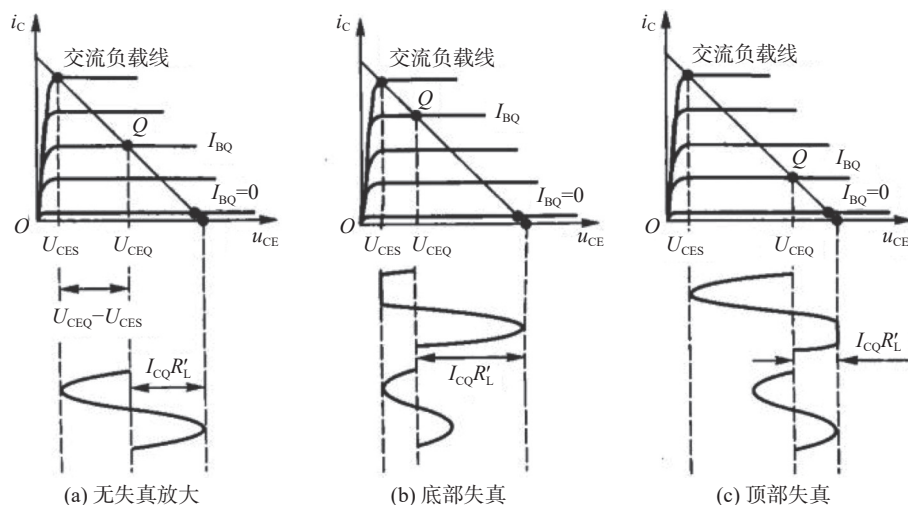


图3 静态工作点位置对三极管输出波形影响对比图

1.1.3 交越失真

交越失真一般发生在推挽放大电路中。推挽电路一般由两个不同极性的三极管构成, 分别对输入信号的正、负半周导通和放大。由于三极管存在死区电压, 信号过零时出现的失真, 称交

越失真^[5]。对于常见的硅管构成的推挽电路, 死区电压为 $-0.7\text{ V} \leq V_{OFF} \leq 0.7\text{ V}$, 当输入信号在零点附近时, 输入电压幅值小于死区电压, 两个三极管均不导通, 无法对输入波形进行放大, 产生交越失真。

1.2 信号失真度测量原理

1.2.1 THD 定义

若一个周期的正弦振荡信号出现失真, 其具有基波分量及多次谐波分量(频率为基波的整数倍)^[6]。将该失真的周期信号按傅里叶级数展开:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-jn\omega_0 t} \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为包括基波和各次谐波的失真波, 展开后的表达式中, $A_0/2=C_0$ 为该信号的直流分量, C_n 为 n 次谐波对应的电压幅值。失真度 D 的测量方法是把各次谐波的电压有效值 U_i 平方后累加, 然后开根号的结果与基波电压有效值 U_1 进行相除, 进而获得所需的失真度值^[7-8]。其计算公式为:

$$D = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} \quad (5)$$

对于单个信号, 其傅里叶级数可展开为无限个谐波累加, 在保证精确度的同时为减少 MCU 运

算量, 该装置的 THD 计算仅计算前 5 次谐波幅值。

1.2.2 基于 FFT 的 THD 测量

采用按时间抽取(decimation in time, DIT)的基-2FFT 算法^[9]对 THD 进行测量。将模拟数字转换器(analog-to-digital converter, ADC)采样得到的 N 个数据倒序输入, 通过 DIT 变换得到信号频域数据, 经过变换后的数据为带有旋转因子的复数表达式, 具有对称性和周期性, 从而减少了运算复杂度。

使用 FFT 得到的信号频谱数据, 设计寻峰算法得到幅值最大的频率(即基波频率), 根据基波频率获取二次谐波到五次谐波的频率及其幅值, 将数据代入 THD 定义式可直接进行求解计算。FFT 进行谱分析时易出现频谱泄露现象, 为说明频谱泄露对 THD 值带来的计算误差, 在不同采样频率和采样点数条件下, 使用 MATLAB R2021a 软件对同一输入信号作 FFT 进行仿真, 以观测频谱泄露的情况, 仿真结果如图 4 所示。

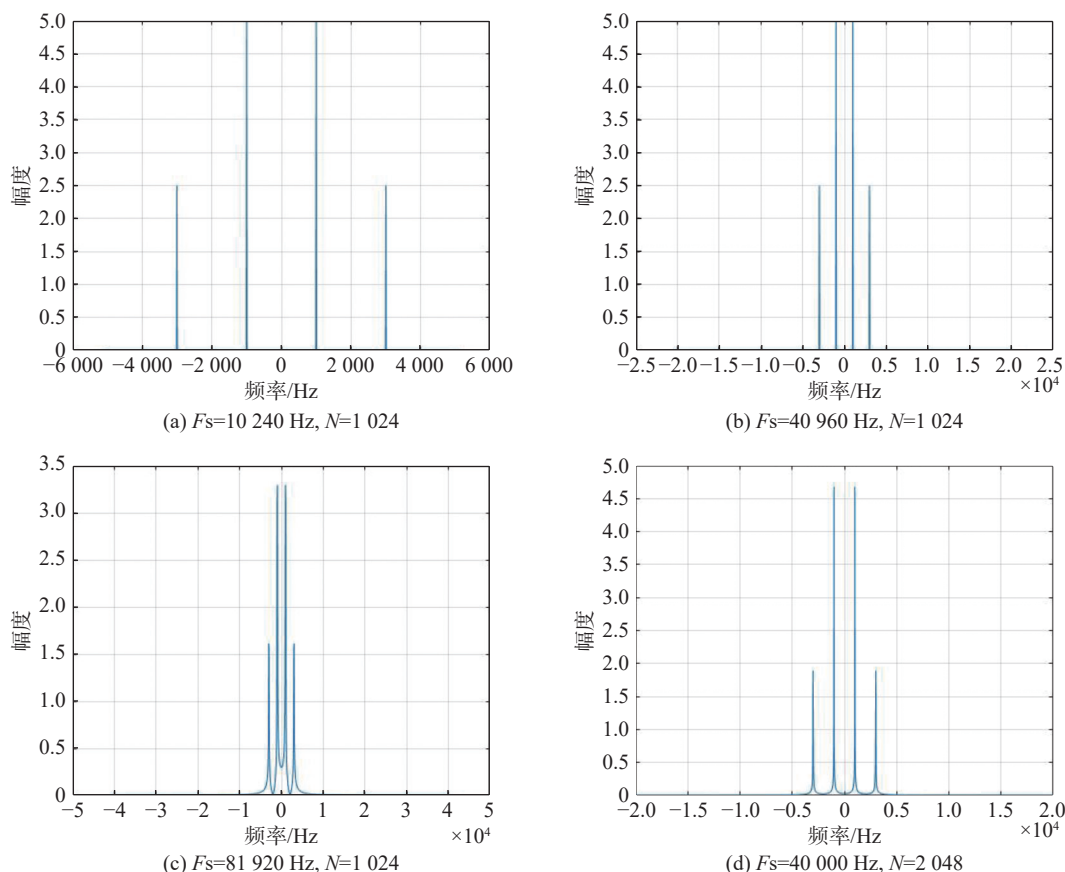


图 4 不同采样率、采样点数下频谱泄露仿真结果图

原始信号为包含 1 kHz 和 3 kHz 的无失真正弦信号, 当采样点数 N 为 1024, 采样频率为

10240 Hz 时, 经过 FFT 变换后的频谱只有两根主瓣谱线(正负频谱左右对称), 如果继续增大采样

频率至 40 960 Hz 和 81 920 Hz, FFT 变换后频谱中除了本来该有的主瓣(1 kHz 和 3 kHz 的输入信号)之外,还会在主瓣附近出现不该有的旁瓣,导致主瓣的幅值降低,能量被分散到其他的频谱上,产生频谱泄露现象,且随着采样频率的增大泄露更加严重。此外,如果使用一些不适当的采样频率如 40 000 Hz,频谱分辨率(采样率和采样点数之比)不为整数,导致两个主瓣的谱线无法落在整数点上,也会产生一定的频谱泄露。主瓣的能量被分散,代入定义式求解得到的 THD 则产生相应的误差。为减少泄露,提高 THD 的精确度,需要增

加数据采样点数或根据采样点数选择合适的采样频率。

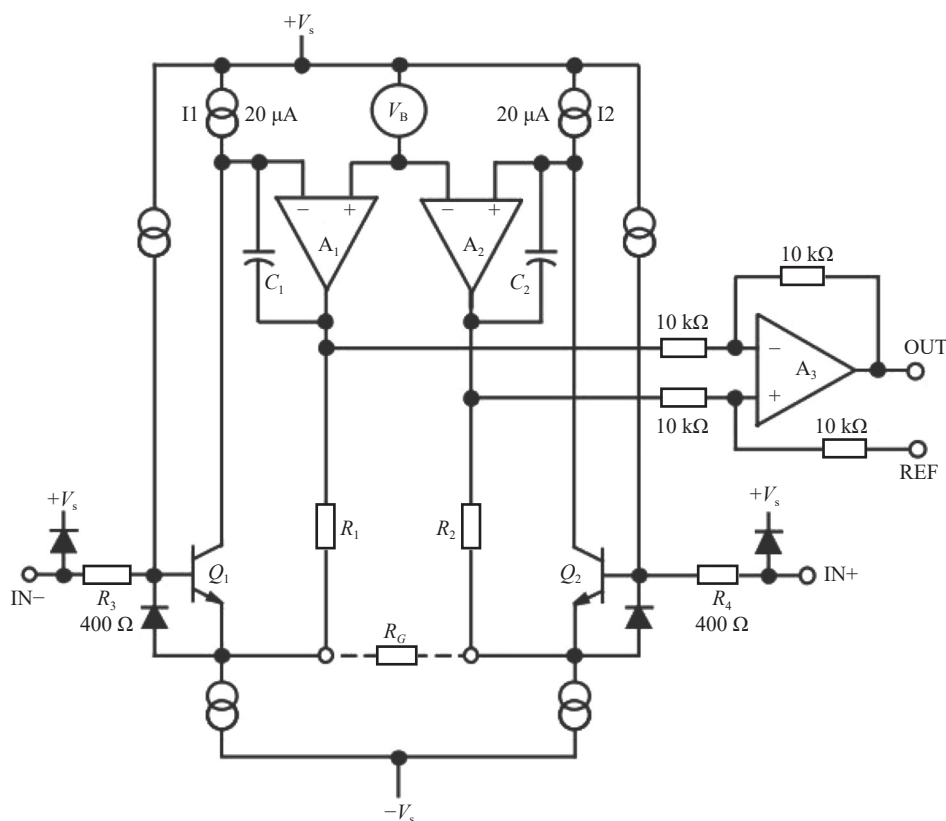
2 装置电路设计与软件控制

2.1 装置硬件电路的设计

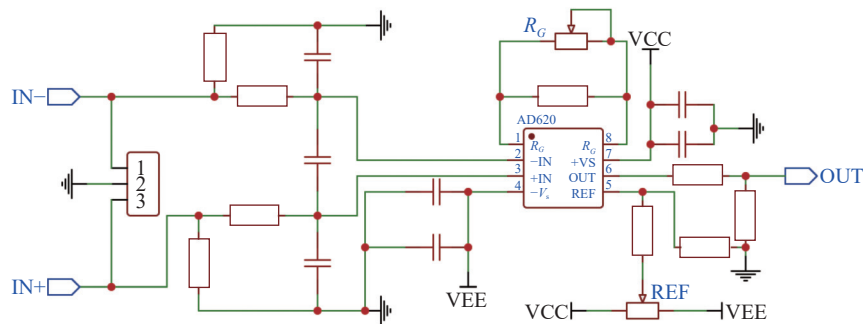
2.1.1 非线性失真信号产生电路

使用 AD620^[10] 运放产生顶部失真和底部失真,运放内部原理图和外部电路设计如图 5 所示。根据 AD620 芯片使用手册,运放输出电压表达式为:

$$V_{OUT} = G(V_{IN+} - V_{IN-}) + U_{REF} \quad (6)$$



(a) AD620 芯片内部结构图



(b) 基于 AD620 的顶/底部失真电路原理图

图 5 AD620 芯片及顶/底部失真电路原理图

式中： U_{REF} 为运放参考电压，可以由外部分压电路抬升或削减，从而改变运放内部三极管的静态工作点，增大 U_{REF} 则静态工作点升高，产生顶部失真，反之产生底部失真； G 为增益系数，由于运放内部增益电阻 R_1 和 R_2 定为 24.7 k Ω ，从而允许使用外部电位器对增益进行精准调节。根据芯片手册，增益 G 的计算公式为：

$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_G} + 1 \quad (7)$$

在外部电路的设计上，使用两个电位器分别调节运放参考电压和放大倍数。AD620 运放 5 脚接电位器 REF，电位器两端连接正负供电电压，顶部失真使用正向电压抬升，底部失真使用负电压削减，具体切换由开关电路控制；1 脚和 8 脚之间接入电位器 R_G 调节放大倍数，使得输出信号峰值超过放大电路最大不失真输出电压的峰值，从而产生失真波形。

无明显失真和双向失真电路使用 THS4001 运放，电路原理图如图 6 所示。该运放供电电压为 $\pm 2.5 \sim \pm 15.0$ V，为使信号便于后续单片机采集，仅使用 ± 3.3 V 电压供电。在 6 脚输出和 2 脚反向输入之间接入电位器构成负反馈，以调节对输入信号的放大倍数。由于运放输入端电流近似为 0，差模输入两端电压近似相等，可计算出电路的增益 G 为：

$$G = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_G + R_9}{R_3} \quad (8)$$

在未添加偏置的情况下，调节负反馈电位器，当输出信号幅值未超过电路的供电电压时，输出无明显失真波形；反之，则输出双向失真波形，具体切换由开关电路控制。

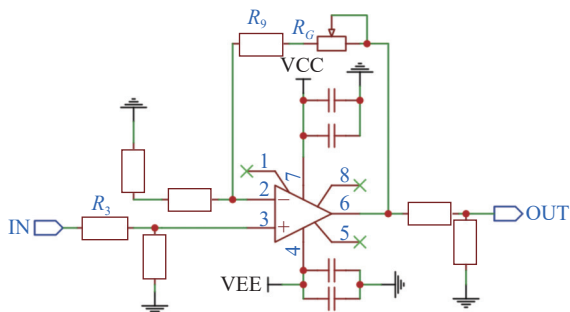


图 6 无明显失真及双向失真电路原理图

交越失真由互补推挽电路^[11]产生，电路原理如图 7 所示。电路使用一对 S8050 NPN 硅晶体管和 S8055 PNP 硅晶体构成推挽电路，当输入信号

过零点时，两个晶体管均截止，输出信号出现交越失真。

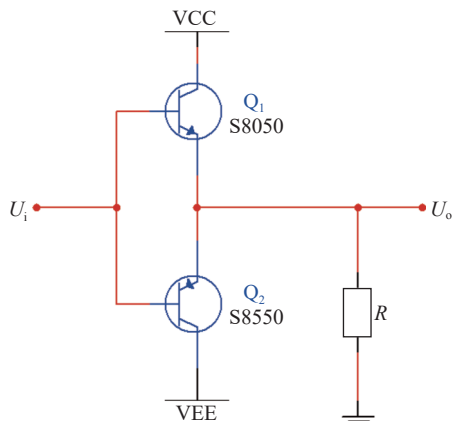


图 7 交越失真电路原理图

2.1.2 信号产生选择控制电路

使用 CD4051 模拟开关芯片以切换不同波形输出。CD4051 是单端 8 通道多路开关，有 3 个通道选择输入端 A、B、C 和一个禁止输入端 INH。A、B、C 用来选择通道号，INH 用来控制开关是否开启。INH 输入高电平，所有通道均断开，禁止模拟量输入；反之，INH 输入低电平，通道接通，允许模拟量输入。模拟开关电路如图 8 所示。

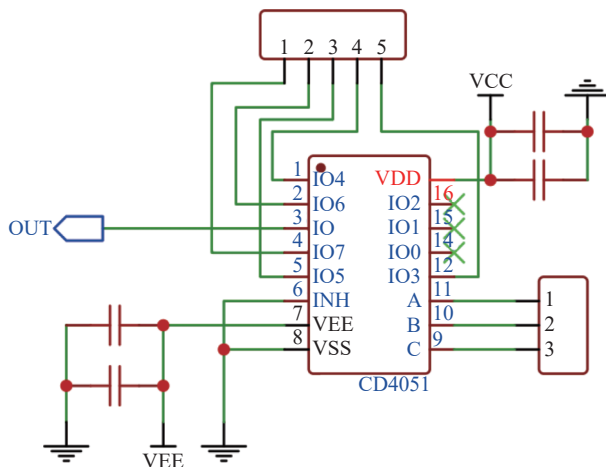


图 8 CD4051 模拟开关原理图

2.1.3 信号失真度测量辅助电路

使用 OPA690 运放设计同向加法器，对生成的 5 种失真信号进行直流抬升，将 5 种信号调理至 0 V 以上，供单片机进行采集；对于峰峰值过大信号，需要使用反向加法器，对信号衰减至 3 Vpp 以下供单片机采集。

使用 OPA690 运放设计电压跟随器，反向输入端直接和地相连，具有输入阻抗高、输出阻抗

小的特点。由于单片机的输入阻抗小,将电压跟随器作为隔离电路,以防止单片机的输入电路对前级失真电路产生影响。

无线传输模块搭载 HC05 蓝牙模块,模块和单片机之间进行串口通信,再将接收到的数据根据蓝牙通信协议打包并传输至手机端 APP 显示。

使用线性电源为装置供电,可以将 220 V 的市电转换为电路可使用的 5.0 V 和 3.3 V 供电。

2.2 信号产生及失真度测量装置的逻辑控制

逻辑控制由 STM32F103ZET6 单片机完成,开发环境为 Keil uVision5 软件。波形数据通过 ADC 进行采集,ADC 的采样频率由 TIME2 时钟

中断控制,并根据实际信号频率选择设置合适的中断时间。开启单片机内部 DMA,将 I/O 口采集到的波形数据快速送入 RAM 存储,随后对传输完成后的 1024 个数据进行 FFT,采用寻峰算法得到基波频率,从而得到前 5 次谐波的频率及其幅值。根据前 5 次谐波的幅值即可计算相应的谐波失真度 THD。单片机和本地显示终端采用串口通信,利用串口屏便于使用者进行人机交互。单片机主要用于协调用户下发的指令和对前级硬件电路的逻辑控制,控制选择电路产生不同的失真波形,最后将数据通过蓝牙通信协议上传至手机端 APP。系统整体逻辑控制流程如图 9 所示。

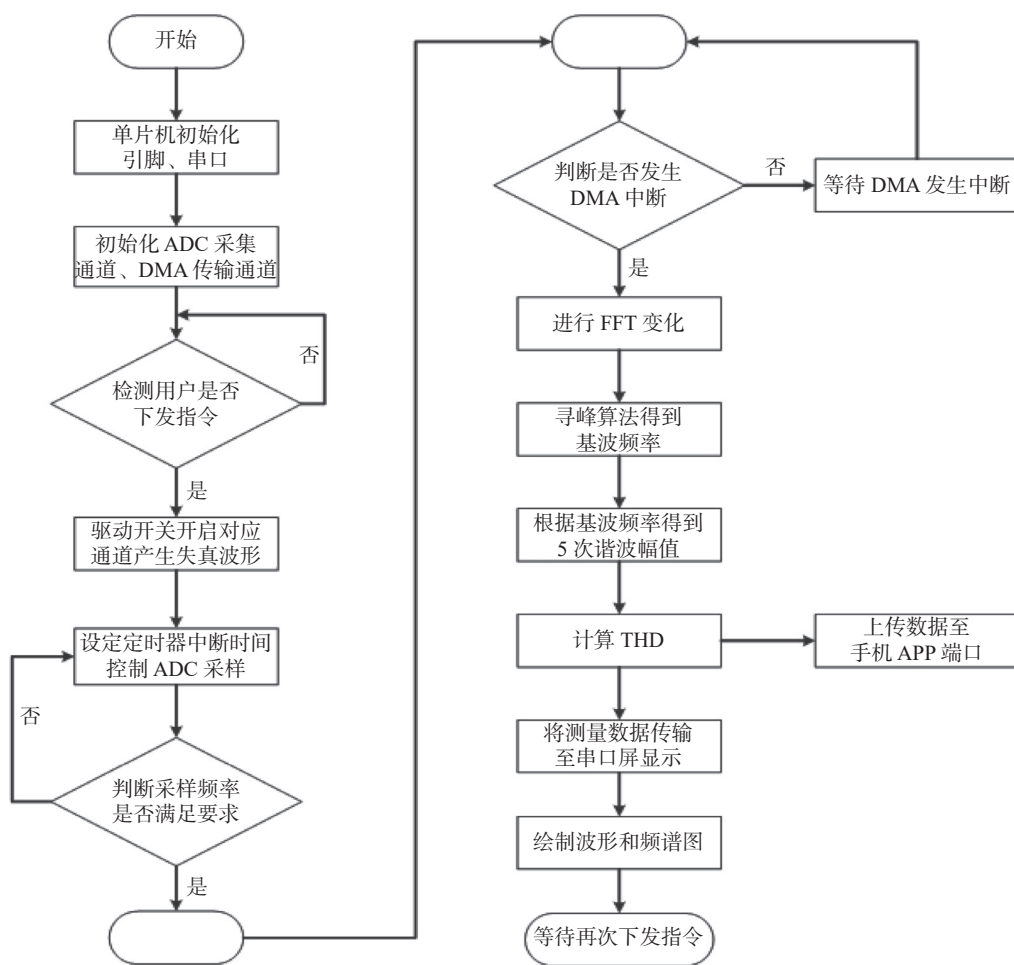


图9 装置软件逻辑控制设计流程图

2.2.1 DMA 传输

DMA 是一种用来提供外设与内存之间、内存与内存之间高速数据传输的机制,无需 CPU 任何干预,通过 DMA 数据就可以快速移动,节省了 CPU 的资源来进行其他任务处理^[12]。通过配置 DMA1 的通道 1,传输 ADC 采集到的数据到 RAM 存储器,加快处理速度,配置 DMA 外设寄存器的

地址为 ADC 数据寄存器的地址,传输数据量为 1024,开启中断请求,DMA 数据传输完成 1024 个数据后产生中断事件对数据进行后续处理。

2.2.2 FFT 算法

基-2FFT 算法的采样点数必须是 2 的整数倍,考虑到 STM32F103ZET6 的 RAM 闪存空间只有 64 K,采样点数不宜过多。因此,选取采样点数

N 为 1024。由频谱泄露仿真可知,当基波频率较高时,由于要采集不同频率基波及其前 5 次谐波,需要设置较高的采样频率,FFT 将会发生频谱泄露。如果采样频率 $F_s \neq Nf_0$,即基频不是 F_s/N 的整数倍,导致基频落在两根谱线之间,频谱泄露会更加严重。因此,需要实时调整 F_s ,低频使用较低的采样频率,避免频谱泄露;高频使用较高的采样频率,减少频谱泄露,并且尽量使 $F_s = Nf_0$,让基频尽可能落在谱线上。在软件编写上为匹配不同频率的基波,使用分支选择结构,对不同频率的基波设置不同的采样频率以减少频谱泄露。

2.3 THD 测量 APP 设计

使用 App Inventor(简称 AI)开发数据远程显示 APP,该软件是一款基于可视化编程环境开发的软件,采用搭积木的方式快速建立应用程序,并且可以结合 AI 伴侣,极其便利地在手机上进行测试和应用。本地上传数据会显示在 APP 中组建的可编辑文本框内,通过蓝牙传输协议,对数据包进行解析,并将解析出来的数据进行显示。无线传输中为防止数据丢失,需要对上传的数据进行编码封包,对于 THD 测量系统,自定义封包方法,将上传数据封包为包头、数据位、校验位和包尾,其中包头、包尾表示数据接收开始和结束,校验位为总传输数据个数,如果接收到的数据个数不等于校验位,则判断此封包接收数据无效。

3 测试与分析

3.1 非线性失真信号产生电路的测试

使用 CD4051 开关控制电路连接 TP 测试端口,使用串口屏下发指令,控制电路导通不同的信号,最后将 TP 测试端口同示波器连接,观测输入波形经过电路后是否按照要求产生 5 种波形,波形测试结果图如图 10 所示。

经试验测试发现,当输入信号为 20 mVpp~3 Vpp, 1~100 kHz 的无失真正弦信号时,用户通过选择想要产生的失真波形按键,单片机将控制选择开关电路实现对应电路的接入。

3.2 THD 测量结果与分析

使用 MATLAB R2021a 软件对无失真正弦波、对称方波、对称三角波和锯齿波进行仿真绘制和 FFT,观测不同种类波形的频谱图,采用的输入信号和仿真结果如图 11 所示。

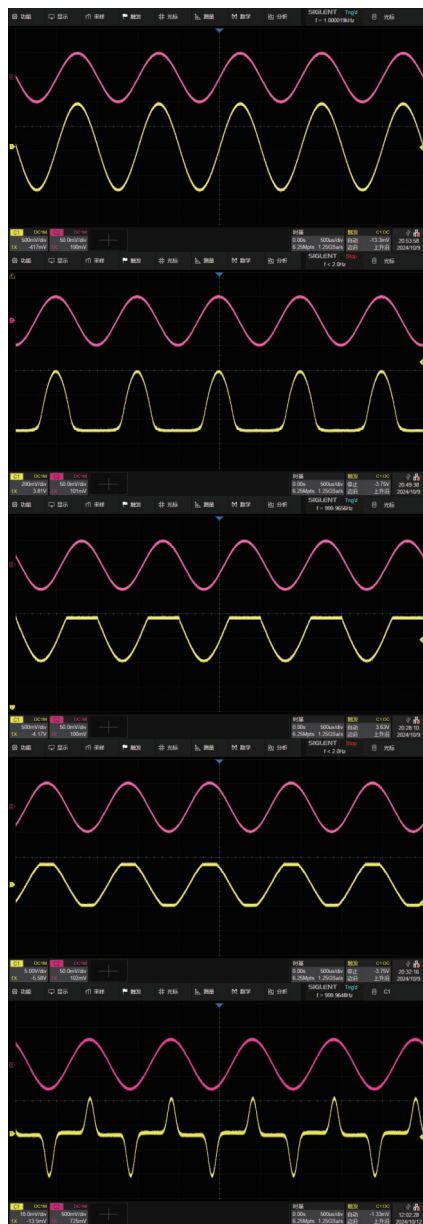


图 10 5 种波形的结果图

经仿真发现,无失真正弦波在频谱上表现为单一频谱(正负频谱左右对称),即 THD 近似为 0;对称方波与对称三角波的波形是偶对称的^[12],在傅里叶级数展开式中,除基波外,只有奇次谐波;对称方波的三次谐波、五次谐波的幅值分别为基波幅值的 1/3、1/5,对称三角波的三次谐波、五次谐波的幅值分别为基波幅值的 1/9、1/25;锯齿波波形呈现非奇非偶特性,在奇数、偶数次频谱上均有谐波分量,失谐度最大。对称方波和对称三角波在各个频率上均有一定的频谱分量,表明 THD 存在且较大。实际上,对 4 种波形进行傅里叶变换并展开,由于算力有限,只取傅里叶级

数的前 5 项, 即可得到对称方波、对称三角波和锯齿波的 THD 理论值分别为 38.87%、11.80% 和 68.88%。数据表明, 信号波形的失真表现越明显, 其对应的 THD 值越大。

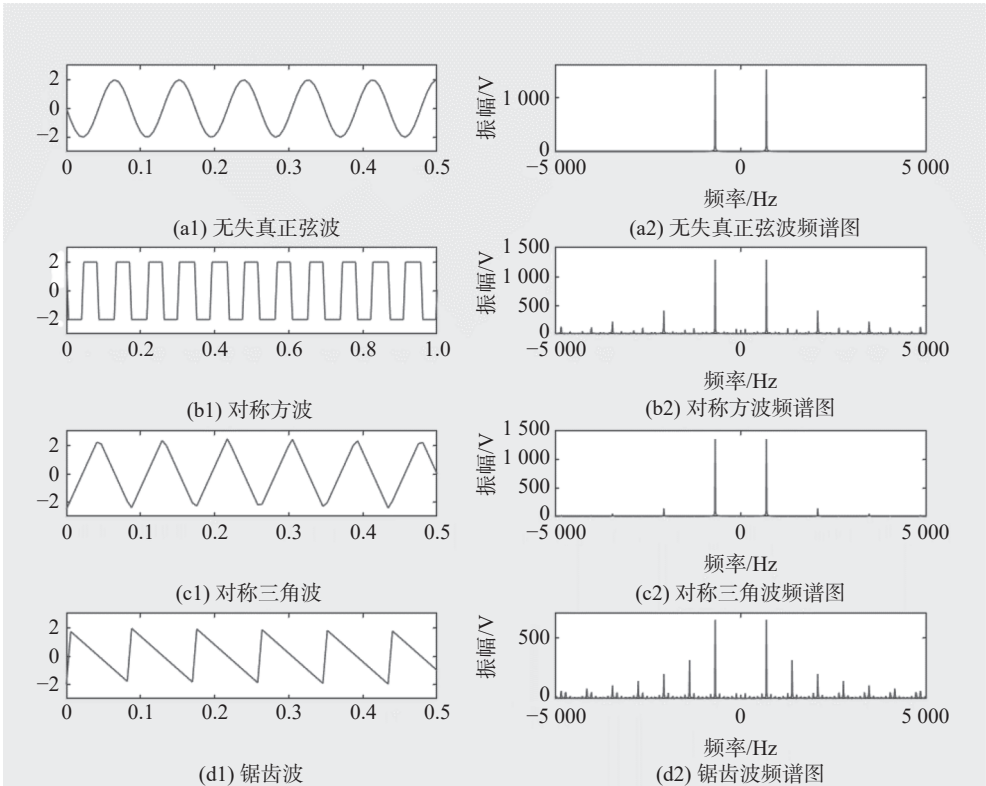


图 11 基于 MATLAB 的 4 种失真波形时域及频域仿真波形图和频谱图

使用函数信号发生器, 分别产生 4 种失真波形, 利用装置进行 THD 的测量与显示, 记录装置采集测量值和输入真实值及其误差, 测试结果如表 1 所示。

之后固定波形为正弦波, 在函数信号发生器上设置不同的基波频率及幅值, 更改谐波次数和谐波幅值, 记录装置测量值和输入真实值及其误差。参数设置和测试结果如表 2 所示, 本地串口

屏显示如图 12 所示。

表 1 不同种类波形的 THD 测量对比表			
被测波形	理论值/%	测量值/%	绝对误差值/%
正弦波	0	0.46	0.460
对称方波	38.87	38.72	0.150
对称三角波	11.80	11.89	0.090
锯齿波	68.88	68.76	0.120
平均绝对误差	—	—	0.205

表 2 不同失真度波形测量值和实际值对比					
基波频率/kHz	基波幅值/V	谐波次数/次	总谐波失真度理论值/%	总谐波失真度测量值/%	绝对误差值/%
1	1.0	3	66.71	66.65	0.06
1	1.5	5	39.01	39.84	0.83
10	1.9	3	28.82	29.31	0.49
15	1.9	5	26.83	25.84	0.99
20	1.9	3	33.70	32.87	0.83
30	3.0	5	10.00	10.34	0.34
40	3.0	5	10.00	9.70	0.30
50	3.0	5	10.00	9.91	0.09
60	3.0	5	10.00	9.50	0.50
70	3.0	5	10.00	9.21	0.79
80	3.0	5	10.00	9.01	0.99
90	3.0	5	10.00	8.66	1.34
100	3.0	5	10.00	8.37	1.63
平均绝对误差					0.71

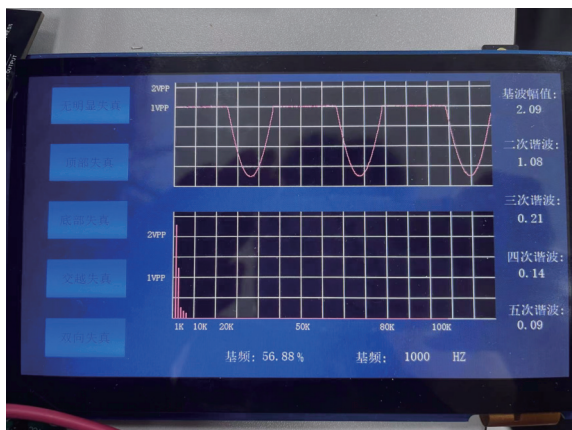


图 12 系统软件测试结果图

3.3 数据远程传输与显示的测试与分析

当装置采集与计算 THD 参数后, MCU 控制无线蓝牙传输模块将失真度、基波幅值、基波频率和各谐波幅值传至手机 APP 端, 在手机 APP 端的 Screen1 屏幕上显示接收值, 并绘制对应的谐波波形。APP 端可通过向右滑动切换至界面 Screen2, 可以下发指令, 控制电路产生不同的失真波形, 并支持将 Screen1 屏幕上接收到的失真度导出和历史数据查看。经测试, 数据上传和显示耗时小于 1 s, 接收数据无误, 使用稳定。手机 APP 端测试结果如图 13 所示。



图 13 远程终端测试结果图

4 结束语

利用该装置可以选择产生无失真放大信号、顶部失真、底部失真、双向失真和交越失真 5 种信号, 自动测量其产生信号的 THD 值, 测量数据误差小, 且整个过程支持数据的可视化、存储和导出追溯。该装置可直观展示信号通过非线性系统的变化过程, 使学生清晰地掌握信号失真机制和谐波分析方法, 为信号非线性失真和 THD 测量教学实践提供自动化测量装置。该装置的设计与实现涉及硬件电路设计与优化、软件算法、无线通信技术和人机交互等多个领域, 促进了跨学科的交流与合作, 为信号处理与分析研究提供新的思路和方法, 推动了信号处理设备的智能化和自动化发展。

参考文献

- [1] 胡朝炜. 数据采集设备的失真度测试方法研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(1): 137-139.
- [2] 刘丽丽, 左继红. 放大器非线性失真测量装置的设计与实现[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(3): 18-21.
- [3] 张威, 张正娴. 一种改进的超低失真度测量方法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(8): 150-153.
- [4] 易承韬. 基于 MATLAB 的 FFT 失真度误差测量研究[J]. 武汉工业学院学报, 2007, 26(4): 61-63.
- [5] 吴天强. 甲乙类功率放大电路交越失真问题研究[J]. 课程教育研究, 2013(10): 187-188.
- [6] 俞达, 陈冬英, 安南, 等. 基于 FFT 算法的低频信号失真度测量装置优化设计[J]. 高师理科学刊, 2022, 42(11): 47-52.

(下转第 42 页)

- 305–311.
- [14] 宋春雷, 路晓亚, 何笑笑. 基于多尺度模糊熵的时间序列特征提取算法[J]. *无线互联科技*, 2023, 20(23): 111–114.
- [15] 滕飞, 黄齐川, 李天瑞, 等. 大规模时间序列分析框架的研究与实现[J]. *计算机学报*, 2020, 43(7): 1279–1292.
- [16] 魏延杰. 基于深度学习的复杂时间序列分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [17] 刘焱昕. 基于数据筛选的不平衡数据重采样方法研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2019.
- [18] 李欣欣. 基于机器学习和重采样的个人贷款违约预测分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2024.
- [19] 王俊霞, 张岩波, 余红梅, 等. 基于高斯混合模型双向聚类重采样和随机森林构建 DLBC 早期复发预测模型[J]. *中国卫生统计*, 2025, 42(1): 7–11.
- [20] 侯贝贝. 基于数据重采样的非平衡数据分类方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [21] 郑重. 类不平衡数据的选择性混合采样方法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2023.
- [22] 张勇飞, 陈涛. 基于时间序列模糊分割的通信数据分类算法设计[J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2023, 53(11): 3268–3273.

编辑 王燕

(上接第 26 页)

- [7] PARK K W, SHIN D W, RHEE Y C. Implementation of MultiBand-digital passive intermodulation distortion measurement system[J]. *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 2016, 11(12): 1193–1200.
- [8] ZHANG J, CHEN Q, ZHOU N G. Correlation analysis with additive distortion measurement errors[J]. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2017, 87(4): 664–688.
- [9] 赵二刚, 王艳芳, 张维. 低频信号失真度测量系统设计[J]. *自动化与仪表*, 2019, 34(12): 53–56.
- [10] 窦如凤, 井娥林. 基于 AD620 的微弱信号放大器设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2021(3): 45–47.
- [11] 洪加强, 刘灵箫, 魏瑞丹, 等. 一种基于自激推挽电路的隔离供电电路: CN115347800A[P]. 2022-11-15.
- [12] 张滔. 基于 STM32 单片机 DMA 机制的多通道数据采集[J]. *黑龙江科技信息*, 2013(30): 27.

编辑 王燕