

2020 年陕西省大学生德州仪器（TI）杯 模拟及模数混合电路应用设计竞赛 设计报告封面

参赛队编号 (参赛学校填写)	学校编号		组（队）编号		选题编号

说 明

1. 本页作为竞赛设计报告的封面和设计报告一同装订。
2. “学校编号”按照赛区组委会分配的数字填写；“组（队）编号”由参赛学校根据本校参赛队数按顺序编排，本科组学生选题队伍数字编排范围（01-50），高职高专组学生选题队伍数字编排范围（从 60 开始顺延）；“选题编号”由参赛队员根据所选试题编号填写。例如：“0105B”或“3367F”。

放大器非线性失真研究装置

摘要

本文设计并制作了一个放大器失真研究装置。其组成部分包括：负反馈 OCL 放大电路、失真调节模块、单片机控制电路及显示模块。其中，核心电路负反馈 OCL 放大器由差分放大器，有源负载放大器及推挽输出级组成，仅靠单套放大器电路即可由单片机控制产生所需的无明显失真波形及四种失真波形。再由单片机基于快速傅里叶变换（FFT）算法实时测量总谐波失真近似值。

测试结果表明，本系统已实现题目所有功能，放大器输出信号峰峰值均在 3.3V 以上，总谐波失真近似值与失真测试仪所测结果之间的绝对误差小于 0.3%，均超过题目要求，且额外实现了顶部底部失真的连续可调，并将系统测试范围由 1kHz 拓展至 50Hz-20kHz。

关键词：负反馈 OCL 电路 FFT 宽频带 非线性失真 总谐波失真

Abstract

In this paper, an amplifier distortion research device is designed and manufactured. Its components include: negative feedback OCL amplifier circuit, distortion adjustment module, MCU control circuit and display module. Among them, the core circuit negative feedback OCL amplifier is composed of differential amplifier, active load amplifier and push-pull output stage. The required waveform without obvious distortion and four kinds of distortion waveform can be generated by single set of amplifier circuit by single chip microcomputer. Then the approximate value of total harmonic distortion is measured in real time based on fast Fourier transform (FFT) algorithm. The test results show that the system has achieved all the functions of the subject. The peak to peak value of the amplifier output signal is above 3.3V. The absolute error between the approximate value of total harmonic distortion and the result measured by the distortion tester is less than 0.3%, which exceeds the requirements of the subject. In addition, the top and bottom distortion can be adjusted continuously, and the test range of the system is extended from 1kHz to 50Hz-20KHz.

Key words: negative feedback OCL circuit FFT broadband nonlinear distortion total harmonic distortion

目录

一. 方案的论证与比较.....	4
1. 方案比较与选择.....	4
2. 系统总体方案.....	5
二. 理论分析与参数计算.....	6
1. 深度负反馈参数计算.....	6
2. 快速傅里叶变换计算.....	6
3. 总谐波失真近似值计算.....	6
三. 电路与程序设计.....	7
1. 电路总体设计.....	7
2. 晶体管放大电路设计.....	7
3. 模拟开关控制电路.....	7
4. 软件设计.....	8
5. 失真原因分析.....	9
四. 测试方案与测试结果.....	11
1. 测试仪器清单.....	11
2. 各波形峰峰值测试.....	12
3. 各波形总谐波失真近似值测试.....	12
五. 总结.....	13
参考文献:	13
附录.....	14
1. 作品照片.....	14
2. 总体电路图.....	16
3. 输出波形.....	17

一. 方案的论证与比较

1. 方案比较与选择

(1) 受控晶体管放大器选择

【方案一】采用无反馈共射放大器接推挽输出

前端采用两级共射放大器，后级使用图腾柱推挽输出。该方案缺点为整体电路开环，需逐级准确调节三极管工作点，工作量大，频率特性差且稳定性较差。

【方案二】采用 OTL 功率放大电路

该方案整体电路采用 OTL 电路，使用一组互补对称电路实现功率放大。其缺点一为该电路拓扑只能采用单电源供电，与双电源电路兼容较差。其缺点二为因为 OTL 电路输出电容大，故其频率特性较差，尤其在低频特性方面不是很理想。

【方案三】采用负反馈 OCL 功率放大电路。

该方案为方案二的升级。OCL 电路省去了输出电容，使系统的低频响应更加平滑，频率特性好且效率更高。OCL 电路拓扑采用双电源供电，与其他双电源电路兼容性好。且 OCL 电路存在深度负反馈，整体电路稳定易调。

综上所述，故选取方案三。

(2) 失真波形表现形式选择

【方案一】为每种失真情况各搭建一套放大器

制作五个拓扑结构相同的放大器电路，每个放大电路呈现不同的失真情况，通过单片机控制多路复选器选择对应失真电路。该方案缺点为电路规模大，调试工作量大，不可改变同套放大器失真状态，无实际工程意义且与题目探究方向略有出入。

【方案二】单套放大器实现多种失真状态可调

在同套放大器中通过改变反馈电阻、输入信号直流电平等方法，使同一个电路在单片机控制下产生各类失真。该方案电路规模小、集成度高、调试工作量小，失真状态连续可调，失真方法直观，且与现实失真原因相符，具有实际工程意义。综上所述，故选取方案二。

(3) 总谐波失真测量

【方案一】采用扫频外差法

利用三角函数的正交性，用一已知参数的扫频的正弦波与待测信号输入模拟乘法器，将输出信号经过一固定中心频率的窄带滤波器，即可依次得到待测信号各频谱分量，采集所需基波及谐波，计算求得总谐波失真度。该方案对扫频正弦波的频率、幅值精度以及失真度要求较高，且带宽及输入信号动态范围受模拟乘法器限制。

【方案二】采用基波剔除法

通过具有频率选择性的无源网络（如：谐振电桥，文氏电桥，双 T 陷波网络等）抑制基波，由总电压有效值和抑制基波后的谐振电压有效值计算出失真度。该方案对选频网络及有效值电路的精度要求较高，同时受限于无源网络，该方案带宽较窄。

【方案三】采用数字频谱分析法

使用 ADC 量化待测信号，使用 ARM、DSP 等数字信号处理平台快速傅里叶变换算法对输入信号进行频谱分析，得出各次谐波幅值，依据总谐波失真定义式计算求得总谐波失真量。

其中，方案三使用数字信号处理技术，可避免模拟运算电路存在的误差问题，精度较高。将算法部署在 STM32F4 等带有浮点处理单元的嵌入式平台上，测量响应迅速，硬件电路简洁可靠。

综上所述，本作品选取方案三实现信号总谐波失真度的测量。

2 . 系统总体方案

放大器非线性失真研究装置总体如图 1 所示。系统主要由三个模块组成：OCL 功放电路、调节失真模块、单片机控制电路及显示模块。

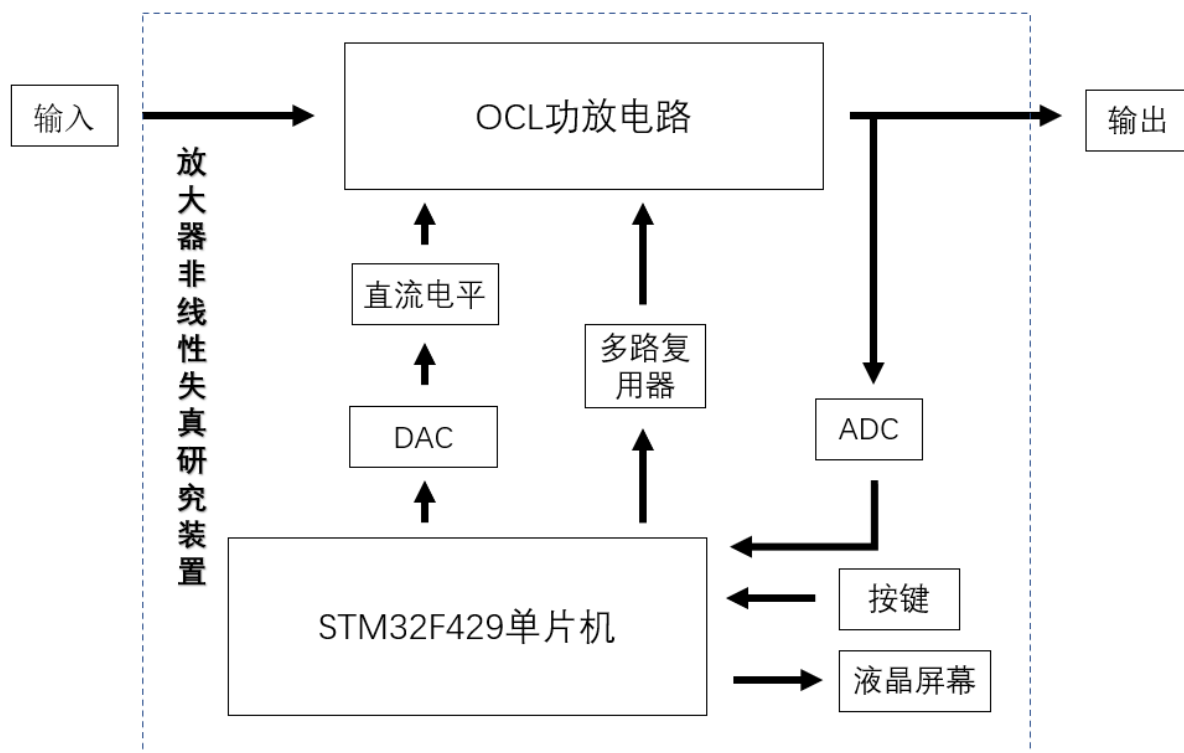


图 1 总体框图

STM32F429 单片机控制 DAC 输出直流电平进行直流工作点调节，通过多路复选器进行交越线路的通断与反馈电阻的改变，通过上述操作获得各个不同的失真波形。单片机通过 ADC 采集输出信号，进行 FFT 后计算得到总谐波失真。

二. 理论分析与参数计算

1. 深度负反馈参数计算

负反馈增益为

$$A_f = \frac{A}{1 + AF}$$

反馈深度 $F(s)$ 为

$$F(s) = 1 + A(s)B(s)$$

在该电路中 $(1 + AF)$ 已远大于 1，此时电路已经进入深度负反馈。

2. 快速傅里叶变换计算

假设采样频率为 F_s ，信号频率 F ，采样点数为 N 。那么某点 n 所表示的频率为：

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

由上面公式可以看出， F_s 所能分辨到频率为 F_s/N 。

假设改点可以由负数 $a + bi$ 表示，那么复数的模为 $A_n = \sqrt{a^2 + b^2}$ ，相位就为 $P_n = a \tan 2(b, a)$ 。

根据以上结果可以计算出 n 点（ $n \neq 1$ ，且 $n \leq N/2$ ）对应的信号的表达式为：

$$F_t = \frac{A_n}{N/2} x \cos(2\pi \times F_n \times t + P_n)$$

3. 总谐波失真近似值计算

总谐波失真定义方式为输入单一频率的余弦信号，输出的各次谐波总有效值和基波功率有效值之比的平方根。计算公式如下：

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{x=2}^n U_x^2}}{U_1} * 100\%$$

在信号处理算法中，先求得 FFT 输出序列的模值序列，记为 $A[N]$ ，使用排序算法求出基波模值 A_1 在 $A[N]$ 中的位置 n ，以 n 为起点， n 为步进遍历 $A[N]$ ，即可依次获得各次谐波模值 A_n ，代入上计算公式，即可求得当前波形的总失真度。

三. 电路与程序设计

1. 电路总体设计

本系统整体电路分为 OCL 功放模块，模拟开关模块与单片机最小系统电路部分。
系统电路总体设计图见附录图 3。

2. 晶体管放大电路设计

本系统使用 OCL 电路作为放大电路。该电路分为差分电路，前级驱动电路，功率放大电路三部分。具体内容如图 2 所示。

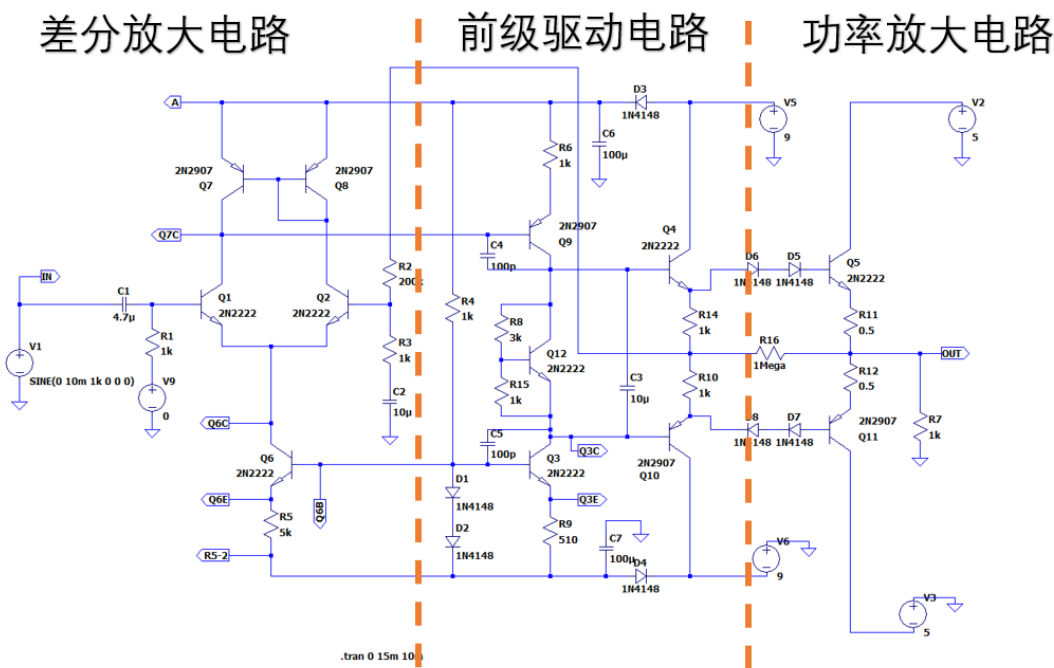


图 2 晶体管放大电路

3.模拟开关控制电路

本系统选用精密模拟开关 ADG419 控制电路失真状态。具体芯片外围电路如图 3 所示。

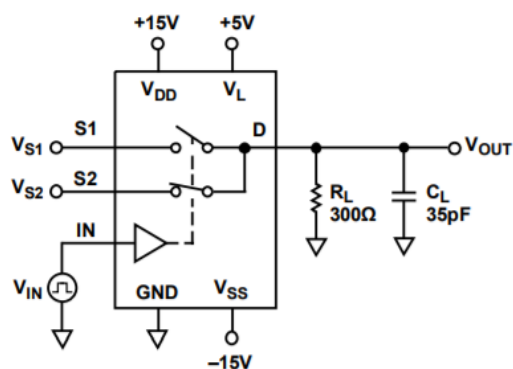


图 3 模拟开关 ADG419

4. 软件设计

晶体管放大器的工作状态及 THD 的测量由单片机程序完成。程序使用定时器触发 ADC 采集放大器输出波形，由 DMA 搬运至单片机内部缓存，并使用快速傅里叶变换算法与均方根算法配合，实时计算波形的总谐波失真度，并在 LCD 屏上显示 THD 数值、时域波形以及频谱图。

同时，由系统滴答定时器触发执行按键扫描，供主函数中运行的状态机跳转使用。由状态机实现对晶体管放大器产生种失真的逻辑控制，同时处理人机交互逻辑。

具体数字信号处理流程图见图 4、5，6 所示。



图 4 主函数流程图

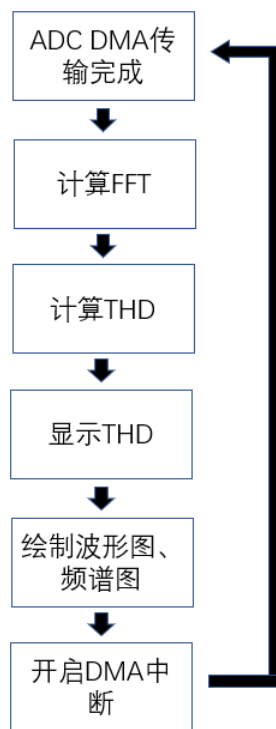


图 5 数字信号处理流程图

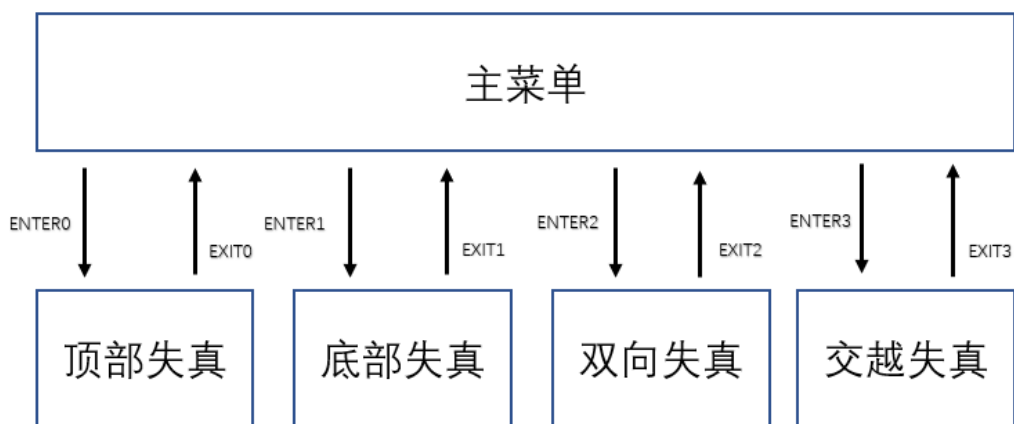


图 6 状态机转移图

5. 失真原因分析

a. 顶部失真与底部失真

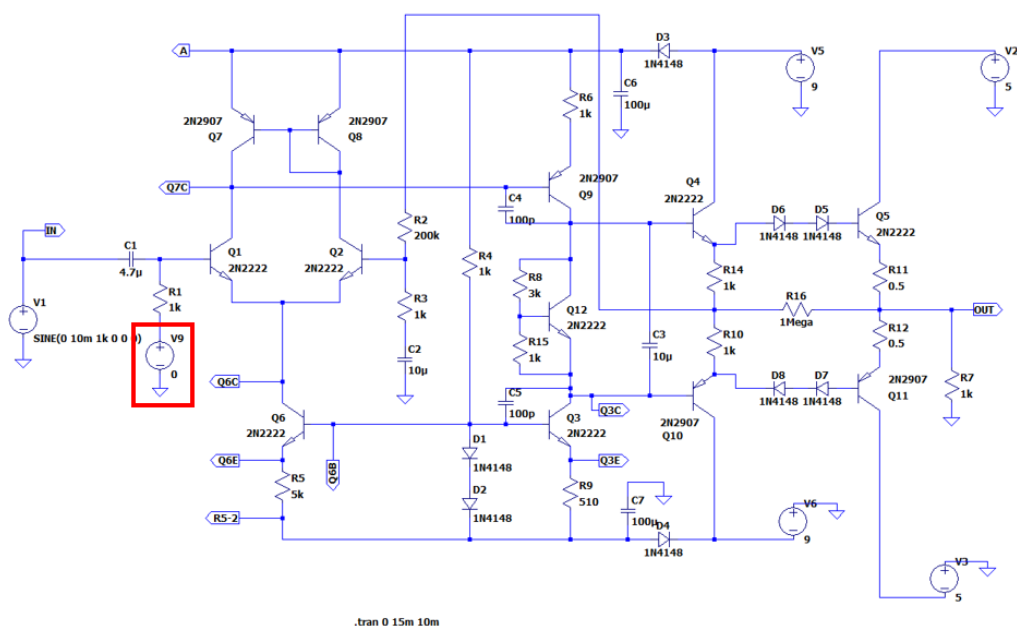


图 7 顶部底部失真调节电路部分

顶部失真又称截止失真，是由于 Q 点过低，输入信号负半周靠近峰值，导致集电极动态电流产生底部失真，从而导致输出波形产生顶部失真。

底部失真又称饱和失真，是由于 Q 点过高，输入信号正半周靠近峰值，导致集电极动态电流产生顶部失真，从而导致输出波形产生底部失真。

图 7 中的框圈出了一个由单片机控制的直流电平输出。通过改变输入信号的直流电平，使输出信号靠近电源的上轨或下轨。当输出信号峰值超过电源轨之后，就产生了顶部失真或底部失真。

b. 双向失真

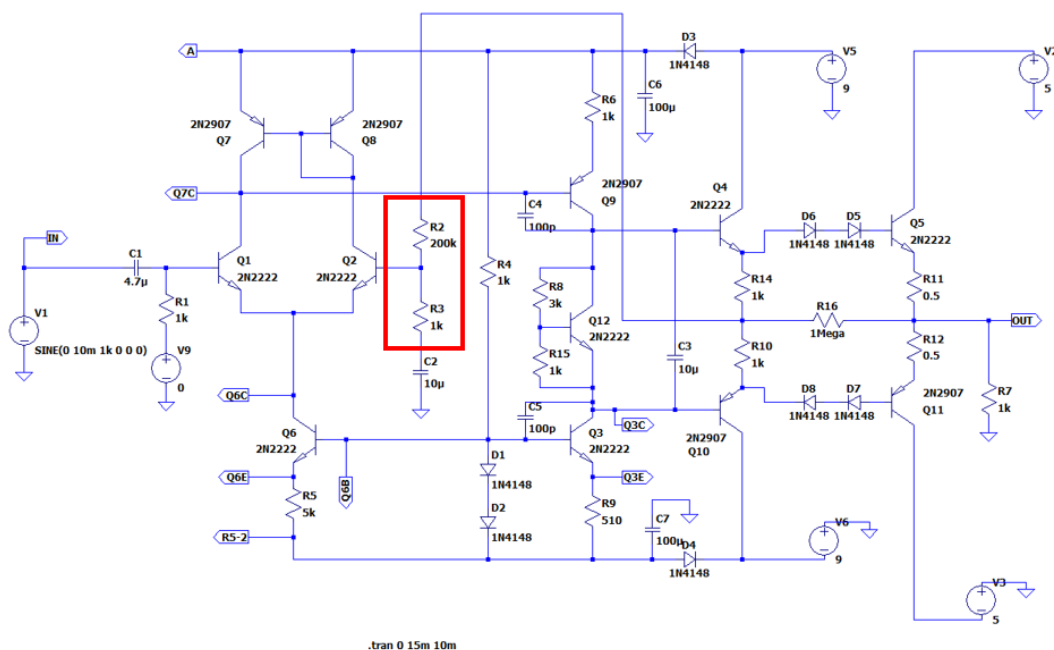


图 8 双向失真调节电路部分

双向失真这是由于输出信号过大，导致输出波形出现削底削顶现象。

图 8 中的框圈出了该放大电路的反馈支路。通过增大反馈电阻 R2，增大放大倍数，使输出信号同时接近电源的上下轨。当输出峰值超过电源轨之后，就产生了双向失真。

c. 交越失真

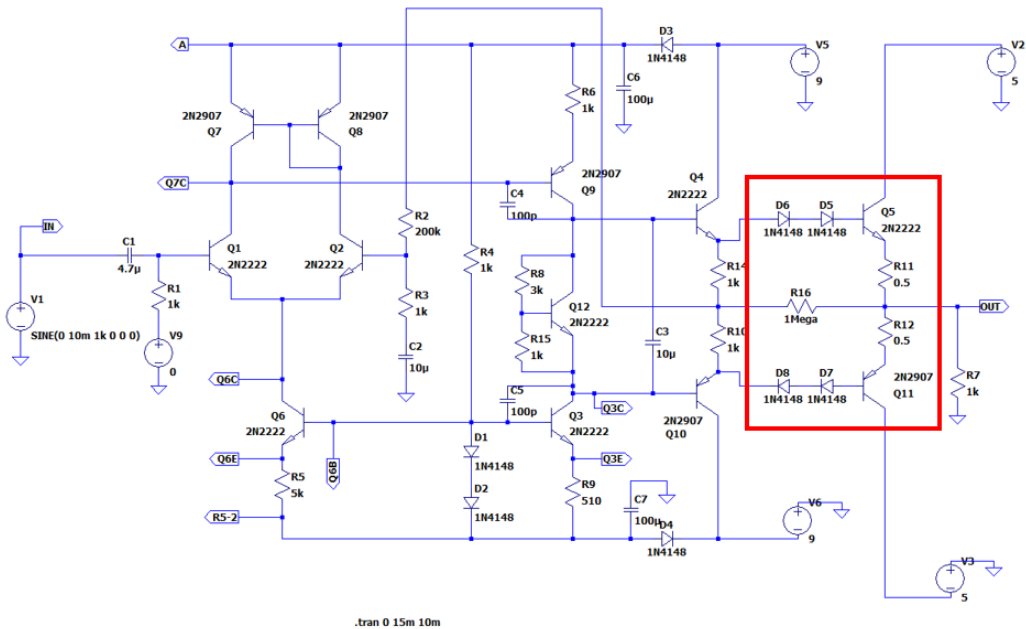


图 9 交越失真调节电路部分

在测试不带补偿电路的推挽放大器时，会观察到波形在越过零点时产生畸变。畸变程度大小由三极管开启电压决定。我们在三极管基级正向串联二极管以使实验结果更明显，具体结构如图 9 中框所示。

在此 OCL 晶体管放大电路中，交越失真可通过深度负反馈补偿，即当反馈电阻 R16 由断路到短接变化时，负反馈程度不断加深，可明显观察到交越失真明显消除。

四．测试方案与测试结果

1. 测试仪器清单

测试仪器及型号如表 1 所示。

表 1 测试仪器清单

序号	仪器名称	型号	指标	生产厂商	数量
1	数字示波器	MSO4034	350MHz	RIGOL	1
2	信号源	DG4202	200MHz	RIGOL	1
3	直流稳定电源	DP832	30V/3A	RIGOL	1

4	失真度测试仪	ZN4116C	5.0Hz-- 199.9kHz	ZHINAN	1
---	--------	---------	---------------------	--------	---

2. 各波形峰峰值测试

测试方案：

外接信号源输出频率 1kHz、峰峰值 20mV 的正弦波，将示波器接入电路测量输出信号峰峰值。测量得到 6 组数据，具体结果如表 2 所示。

表 2 各波形峰峰值测量结果表（单位：V）

测试序号	1	2	3	4	5	6
无失真波形 V_{pp}	5.35	5.31	5.34	5.37	5.34	5.37
顶部失真波形 V_{pp}	3.36	3.40	3.41	3.32	3.35	3.38
底部失真波形 V_{pp}	4.94	4.92	4.97	4.98	4.92	4.92
双向失真波形 V_{pp}	8.92	8.99	8.92	8.93	8.83	8.85
交越失真波形 V_{pp}	3.52	3.56	3.54	3.55	3.51	3.50

结果与误差分析：

- （1） 输出信号峰峰值均大于 3.3V, 远高于题目要求的 2V。
- （2） 各次实验之间峰峰值有微小波动，经分析是由于轻微底噪造成。

3. 各波形总谐波失真近似值测试

测试方案：

外接信号源输出频率 1kHz、峰峰值 20mV 的正弦波，将单片机与失真测试仪接入电路中，分别测量计算 THD 值。测量得到 5 组数据，具体结果如表 3 所示。

表 3 各波形总谐波失真近似值测试结果

波形	单片机所得 THD	失真度测量仪所得 THD	绝对误差
无失真波形	1.2%	1.1%	0.1%
顶部失真	26.5%	26.2%	0.3%
底部失真	5.4%	5.2%	0.2%
双向失真	33.7%	33.2%	0.5%
交越失真	14.5%	14.9%	0.4%

结果与误差分析:

- (1) 单片机计算所得 THD 基本没有偏差, 相对误差在 5%以内, 绝对误差在 0.5%以内。
- (2) 误差原因: 经分析, 快速傅里叶变换处理中的频谱泄露问题为 THD 测量误差的主要原因, 同时, ADC 模拟前端的非线性也会带来 THD 测量的误差。

五. 总结

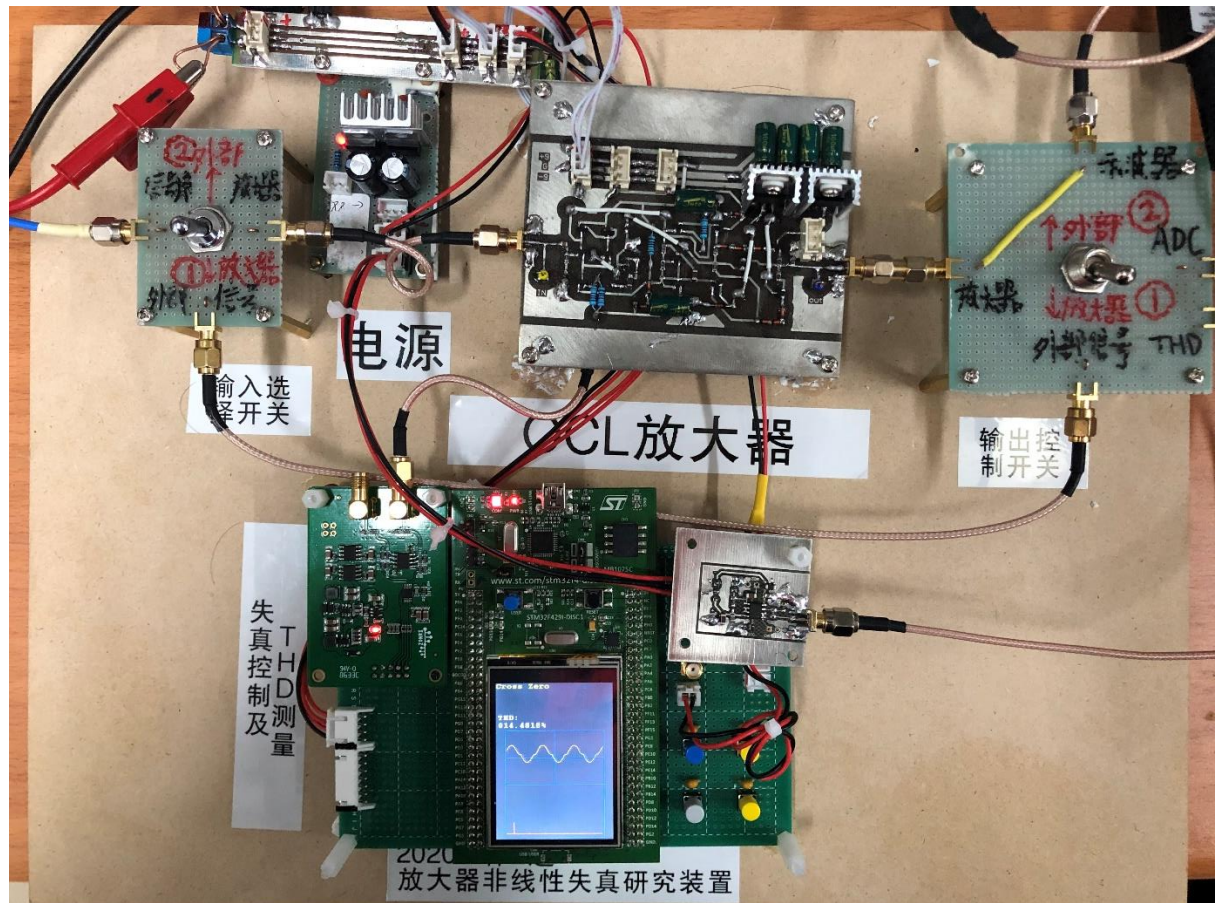
本文以 STM32F429 单片机为控制核心, 设计并制作了一个放大器非线性失真研究装置。经过最终的级联和调试, 测试结果表明, 系统测得的各失真波形的峰峰值均大于 3.3V, 远大于题目所要求的 2V; 单片机测量的总谐波失真近似值与失真度测试仪所求近似值绝对误差控制在 0.5%之类。同时, 屏幕显示界面、按键交互友好。除了实现题目要求的所有功能外, 并额外实现了放大器的顶部、底部失真程度程控可调, 以及拓展放大器带宽为 50Hz 至 20kHz。

参考文献:

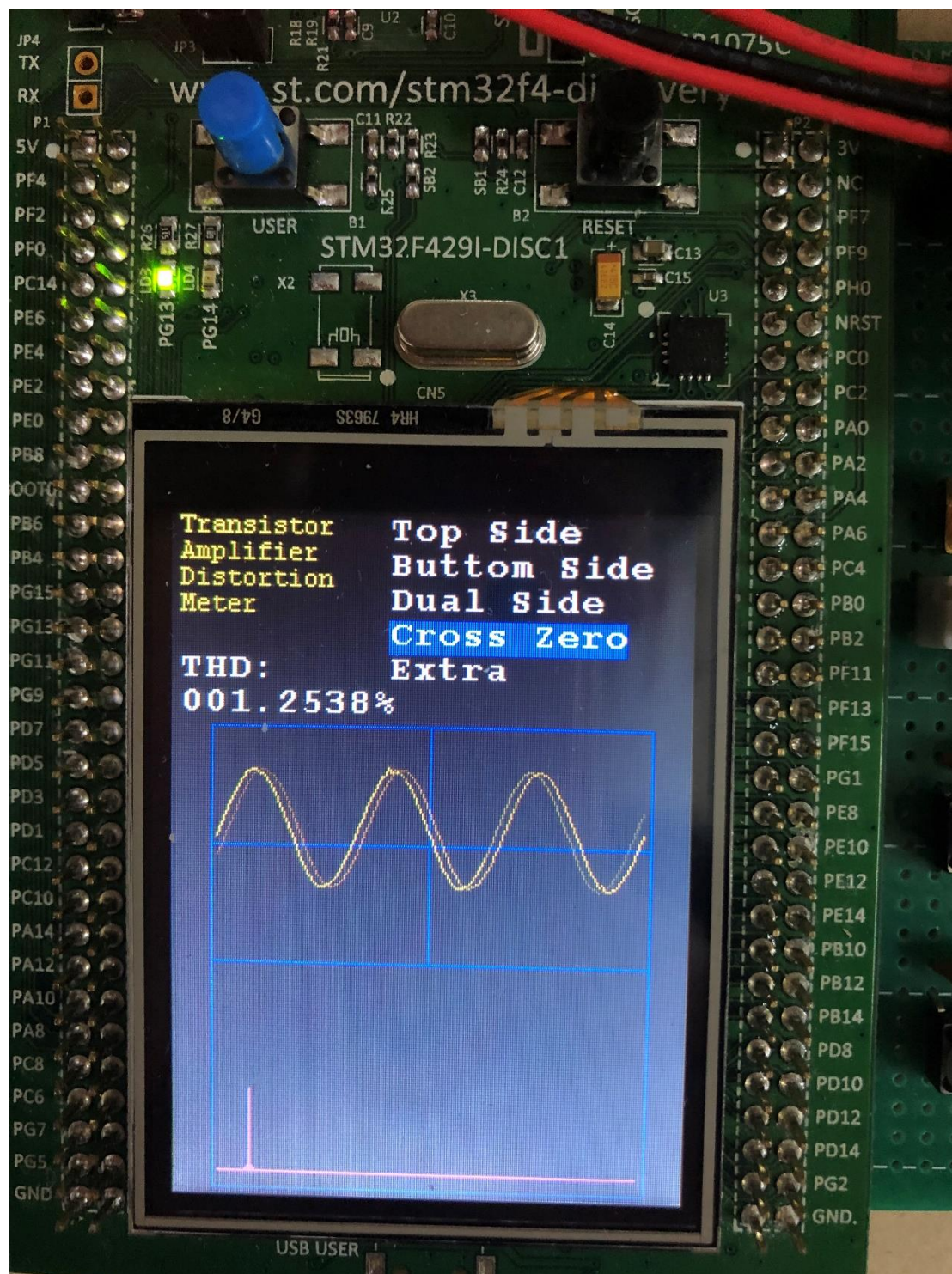
- [1]杨建国. 新概念模拟电路. 西安: 西安交通大学电工电子中心. 2018
- [2]黄根春, 陈小娇, 张望先. 电子设计教程. 北京: 电子工业出版社, 2008
- [3]黄根春, 周立青, 张望先. 全国大学生电子设计竞赛教程——基于 TI 器件设计方法. 北京: 电子工业出版社. 2011
- [4]吴定昌, 模拟集成电路原理与应用. 广州: 华南理工大学, 2001. 8

附录

1. 作品照片

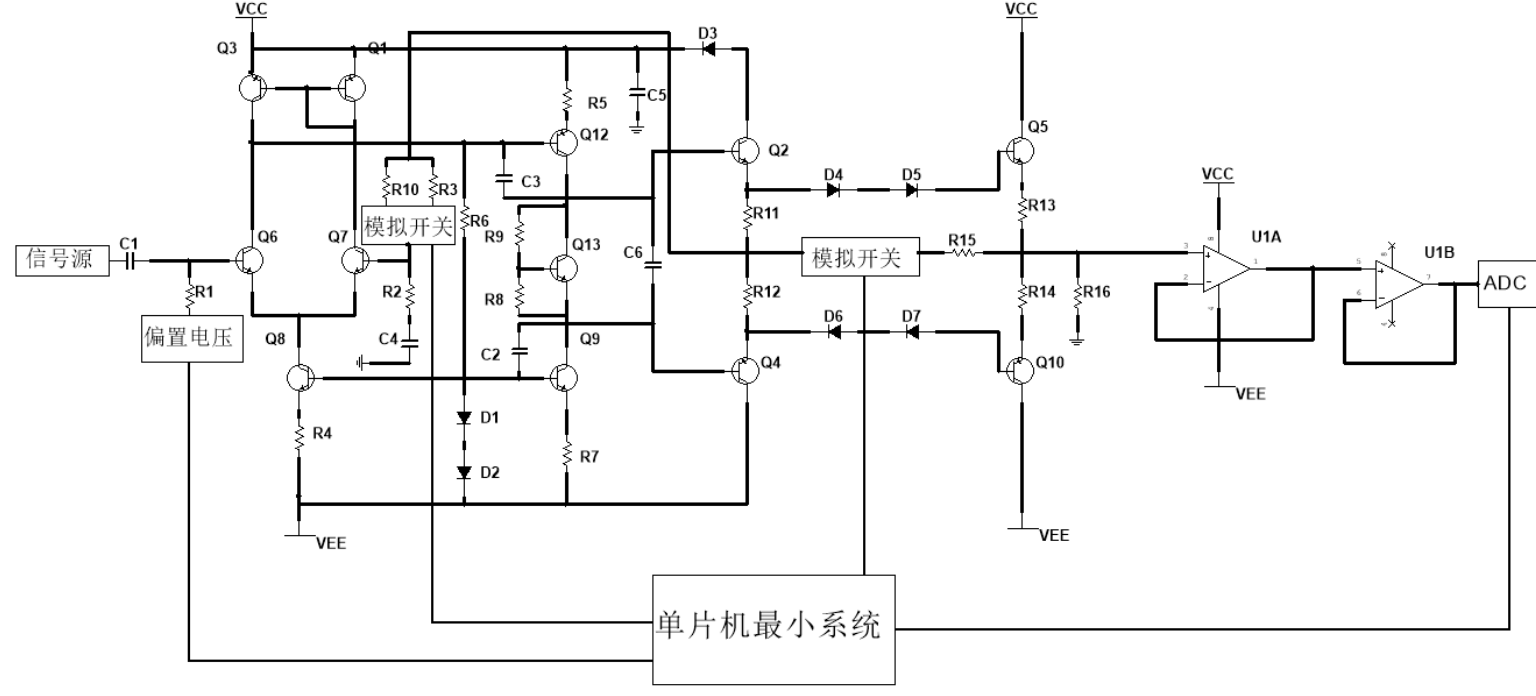


附图 1 作品照片



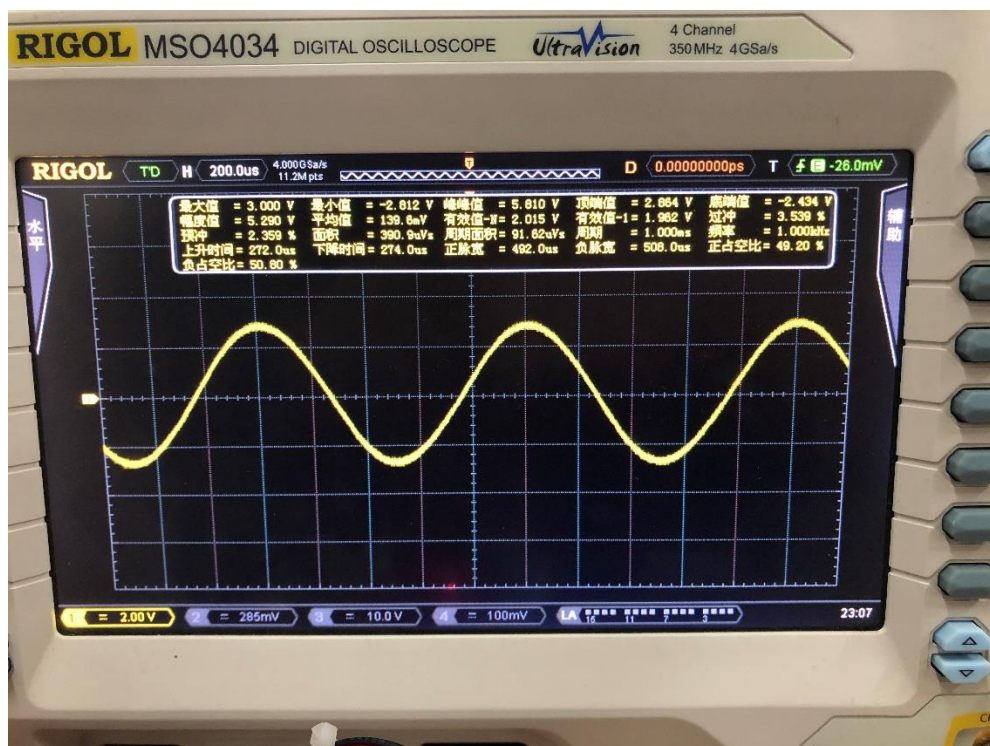
附图 2 THD 测量结果

2. 总体电路图

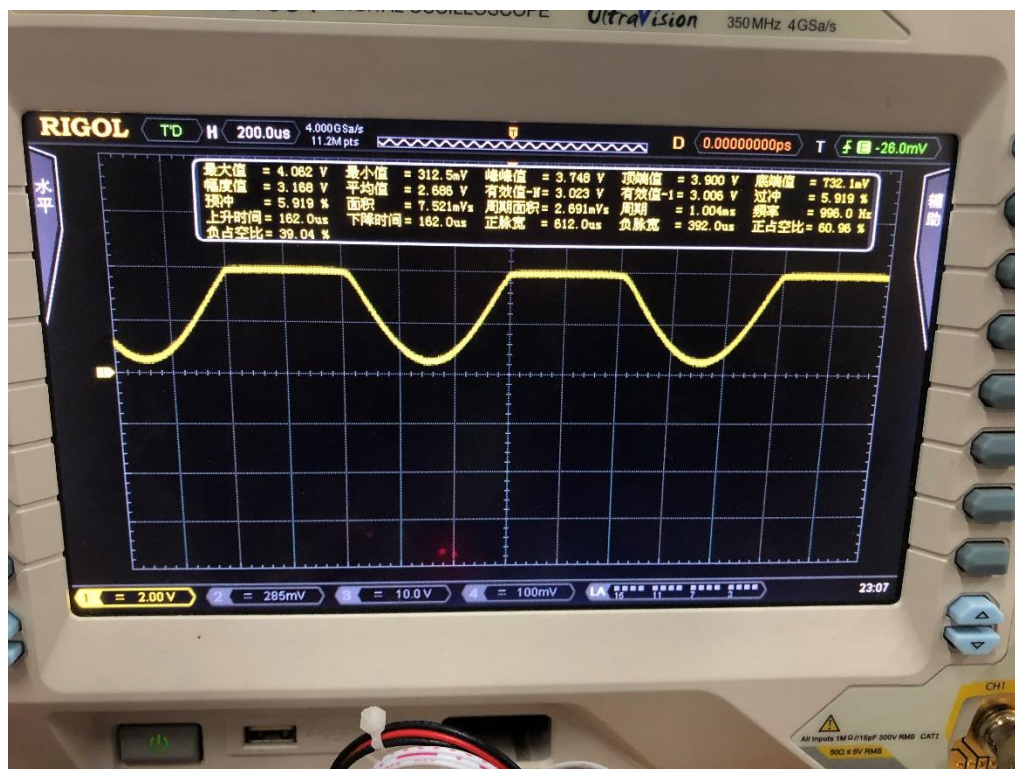


附图 3 总体电路图

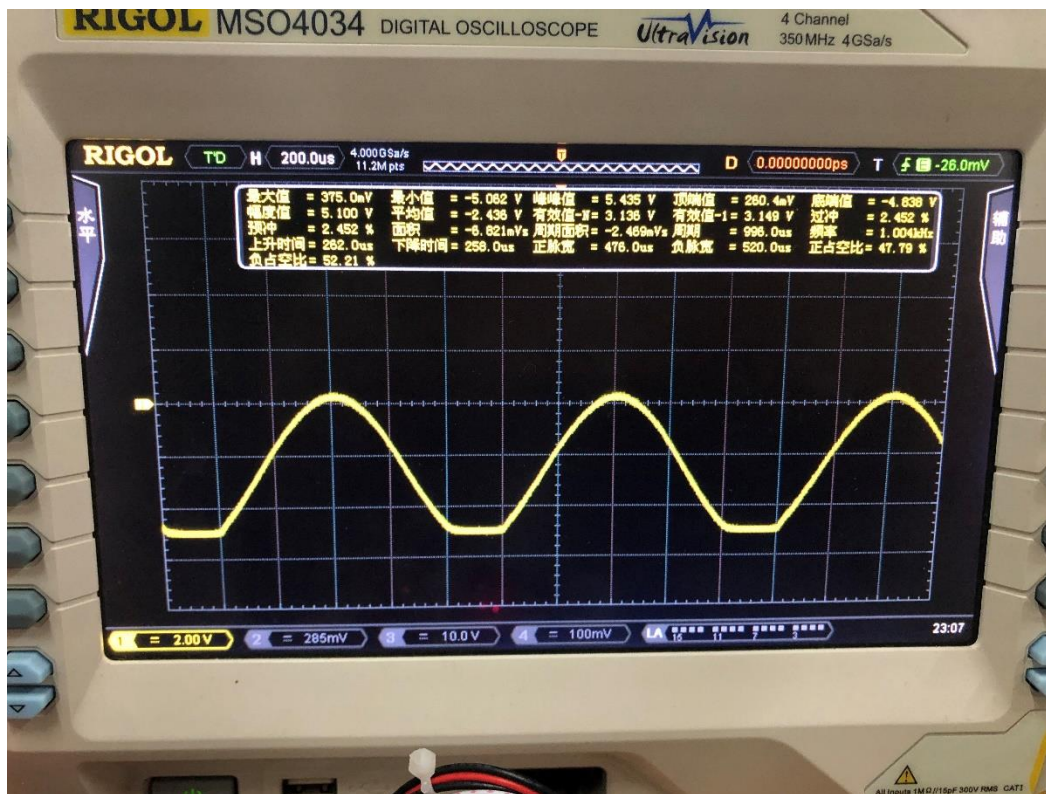
3. 输出波形



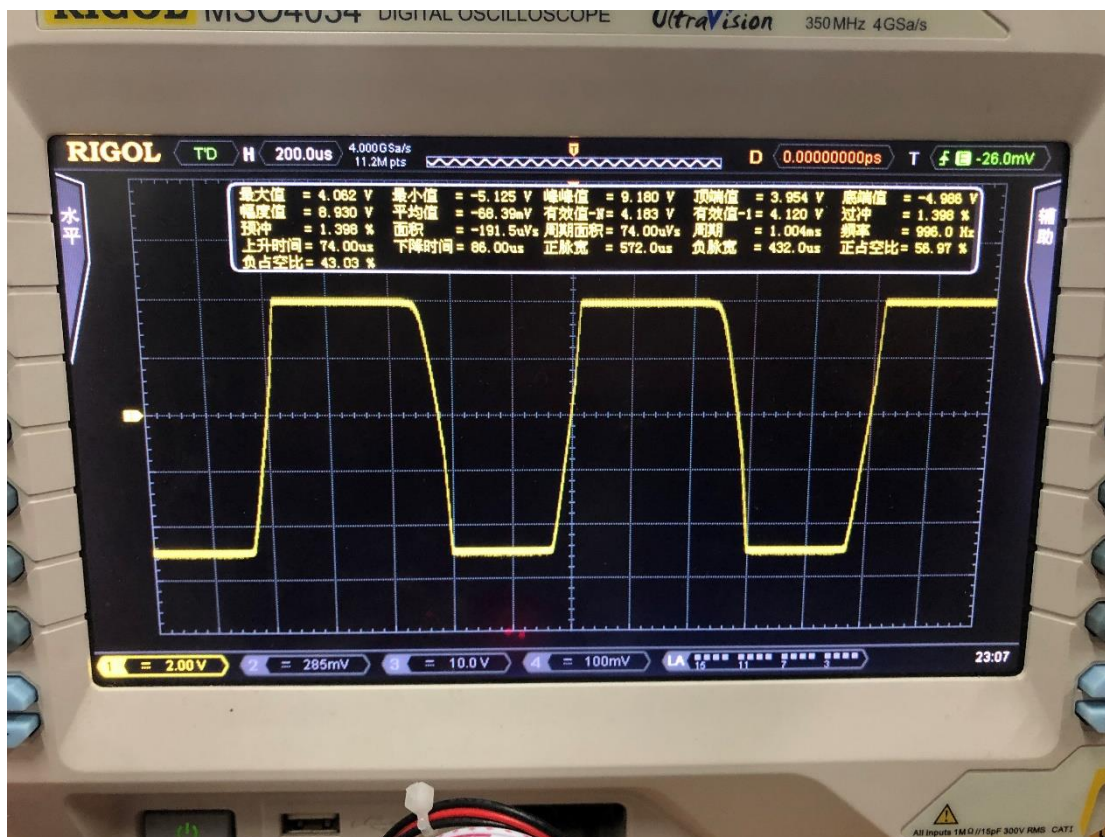
附图 4 无失真波形



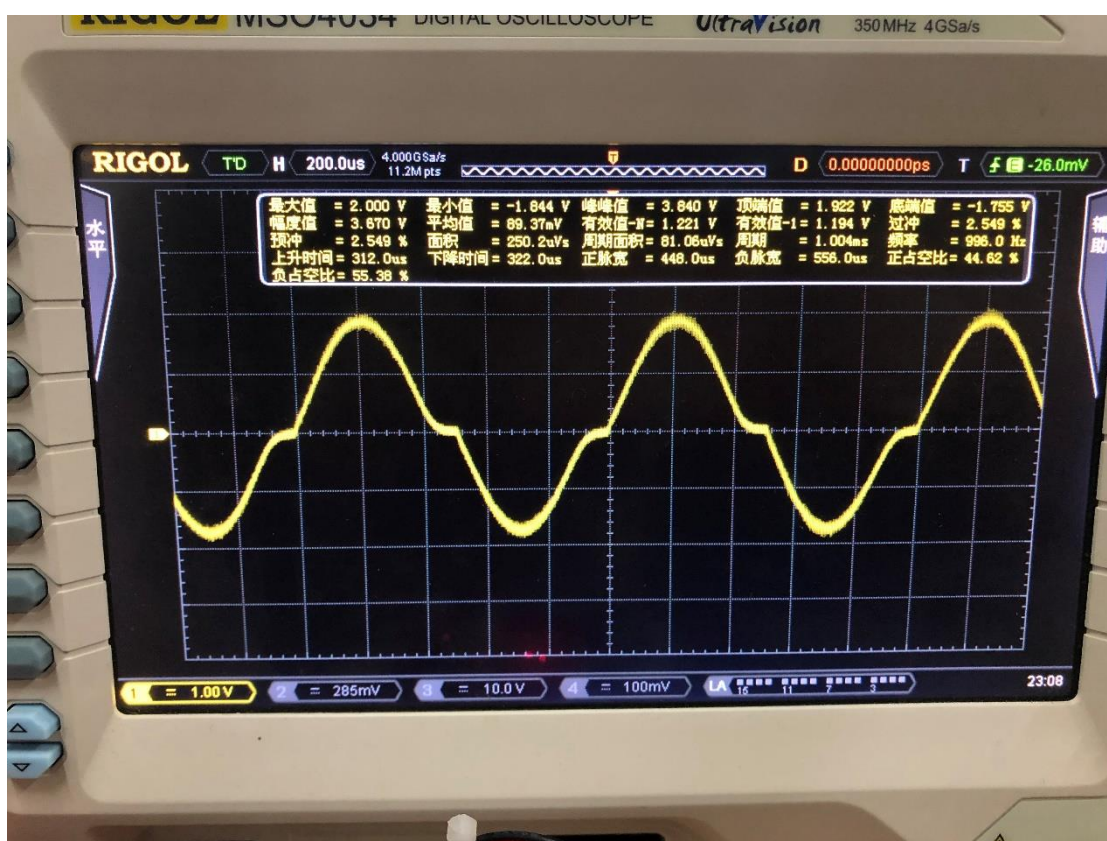
附图 5 顶部失真



附图 6 底部失真



附图 7 双向失真



附图 8 交越失真