

文章编号: 1671-7449(2024)03-0323-07

高压非共地信号采集系统设计及误差标定分析

丁予博¹, 丁立波^{1*}, 肖立², 徐建¹, 尹佳韵¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210000; 2. 驻重庆地区第二军事代表室, 重庆 401100)

摘要: 针对引信电路板拼板测试需求, 设计了一种多通道高压非共地信号采集系统。建立了信号调理电路和模数转换电路的误差模型, 提出了增益误差校准算法, 解决了信号采集电路在小电压范围内相对误差过大的问题, 保证了全电压范围内的采集精度。同时, 提出了信号调理电路模块化标定技术, 通过最小二乘法求出标定最优解, 实现了对信号调理电路的软件校准, 解决了因分压电阻阻值误差、运放失调电压产生的误差问题。经试验验证表明, 数据采集系统能够精确复现多通道信号波形, 全电压范围内的相对误差不超过1%, 满足测试系统精度需求, 大大简化了多通道调理电路标定步骤。

关键词: 高压非共地信号; ADC采集电路; 调理电路; 误差校准; 模块化标定

中图分类号: TP274.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024041

引用格式: 丁予博, 丁立波, 肖立, 等. 高压非共地信号采集系统设计及误差标定分析[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 323-329.

DING Yubo, DING Libo, XIAO Li, et al. Design and error calibration analysis of high-voltage non-common ground signal acquisition system[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(3): 323-329.

Design and Error Calibration Analysis of High-Voltage Non-Common Ground Signal Acquisition System

DING Yubo¹, DING Libo^{1*}, XIAO Li², XU Jian¹, YIN Jiayun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;

2. The Second Military Representative Office in Chongqing, Chongqing 401100, China)

Abstract: Aiming at the test requirements of fuze circuit board panels, a multi-channel high-voltage non-common ground signal acquisition system is designed. The error model of the signal conditioning circuit and analogue-to-digital conversion circuit is established, and the gain error calibration algorithm is proposed, which solves the problem of excessive relative error of signal acquisition circuit in small voltage range and ensures the acquisition accuracy in the full voltage range. At the same time, the modular calibration technology of the signal conditioning circuit is proposed, and the optimal solution for calibration is obtained by the least squares method, which realizes the software calibration of the signal conditioning circuit, and solves the error problem caused by the resistance error of the voltage division resistor and the offset voltage of the op-amp. The experimental verification shows that the data acquisition system can accurately reproduce the multi-channel signal waveform, and the relative error in the full voltage range does not exceed 1%, which meets the accuracy requirements of the test system and greatly simplifies the calibration steps of the multi-channel conditioning circuit.

Key words: high-voltage non-common ground signal; ADC acquisition circuit; conditioning circuits; error calibration; modular calibration

收稿日期: 2023-07-28

作者简介: 丁予博(1999-), 男, 硕士生, 主要从事智能引信研究。E-mail: 18595535085@163.com。

* 通信作者: 丁立波(1977-), 男, 副教授, 主要从事控制制导与控制研究。E-mail: dinglibo@njust.edu.cn。

0 引言

在引信生产阶段,对其进行全面的参数测试至关重要。通过对采集得到的信号进行分析,及时发现故障产品为引信能可靠作用提供了保障。传统信号采集系统只对模拟数字转换器(Analog-to Digital Converter, ADC)芯片进行误差校准,未考虑小电压范围内采集精度^[1-2],因此,不适用于高精度高压非共地信号的采集。近年来有学者对信号调理电路进行误差校准,通过对信号调理电路的主要元器件分别进行参数标定,实现了信号的较高精度实时采集,但标定步骤繁琐且多次标定会引入测量误差^[3-4]。同时,也有学者提出了信号调理和检测通路复用的方式,通过对一个调理通道的元器件参数标定,实现了信号的高精度采集,但未考虑多路同时采集,采集效率不高^[5]。

针对引信电路板板级测试的需求,本文设计了多通道高压非共地信号调理电路与ADC采集电路,并对系统误差源进行了分析,建立了误差模型,提出信号调理电路软件标定与模数转换的增益误差校准算法,简化了标定步骤,实现了多通道高压非共地信号的高精度采集。

1 信号采集系统设计及误差源分析

1.1 采集系统总体方案设计

采集系统结构如图1所示,引信拼板包含10块单元板,各单元板之间相互独立,无电气连接。信号采集板包含10路采集通道,各采集通道之间电路结构相同且相互独立,因此,本文仅对其中一路采

集通道进行分析。引信单元板与下方对应的调理通道通过探针相连,每排的5个通道共用一块ADC芯片,可实现5个通道连续采集或单独采集。

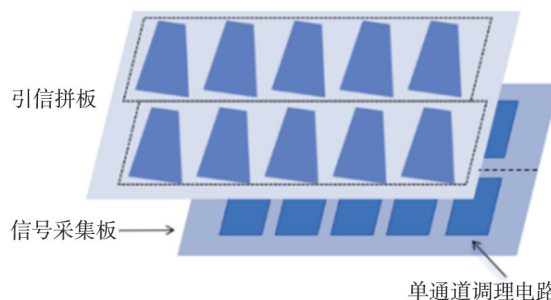


图1 采集系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the acquisition system

1.2 调理电路设计

本采集系统采集对象为电容储能电路板拼板,单个电容储能电路如图2所示,采集电压点为O点。稳压管将15V电压稳压至13V,通过测量O点的电压,判断引信电路板的供电电压是否合格。

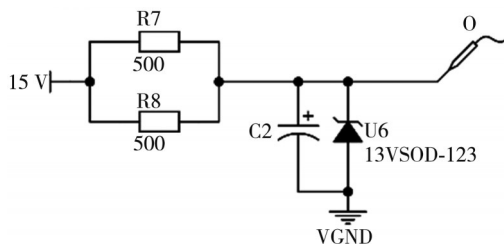


图2 电容储能电路图

Fig. 2 Capacitor energy storage circuit diagram

如图3所示为采集系统的单个通道的调理电路,信号调理电路分为三级,将大电压调理到合理的范围内,保证信号被完整采集^[6]。

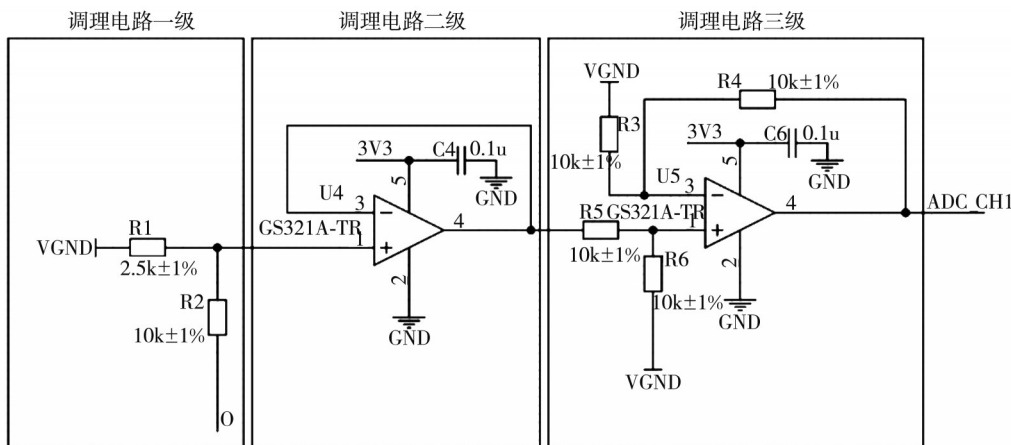


图3 调理电路原理图

Fig. 3 Resistor divider and voltage following circuit diagram

第一级为信号拾取电路,引信电容储能电路输出为0~13 V,因此设计由串联电阻组成信号拾取电路,将输入电压的五分之一送入后级信号采集系统。理想信号拾取电路输出电压与输入电压的关系为

$$V_{OUT1} = \frac{R1}{R1 + R2} \times (V_{IN1} - VGND)。 \quad (1)$$

第二级为跟随电路,受前级信号源电阻的影响,会导致保持电容充满电所需的时间延长而引起采样误差,因此,在信号拾取电路后级设计跟随电路,可以将前级电路与后级ADC采集电路分隔,减小信号损失。此外,电压跟随器输入阻抗高、输出阻抗低,常被用来实现阻抗匹配的功能。理想电压跟随电路输出电压与输入电压的关系为

$$V_{OUT2} = V_{IN2}。 \quad (2)$$

第三级为减法电路,由于引信电路板与信号采集系统无公共地,两者地之间存在压差,因此

需要第三级减法电路减去两者参考地之间的压差。理想减法电路输出电压与输入电压的关系为

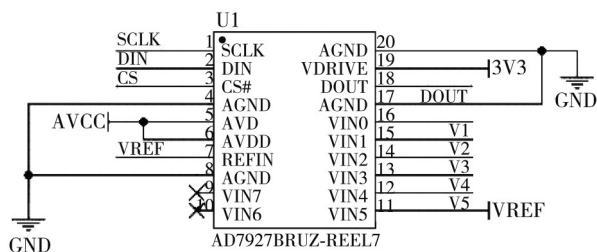
$$V_{OUT3} = R4 \times \left(\frac{V_{IN3}}{R5} + \frac{VGND}{R6} \right) - \frac{R4}{R3} \times VGND。 \quad (3)$$

根据式(1)~(3),三级调理电路耦合之后理想输出与输入电压的关系为

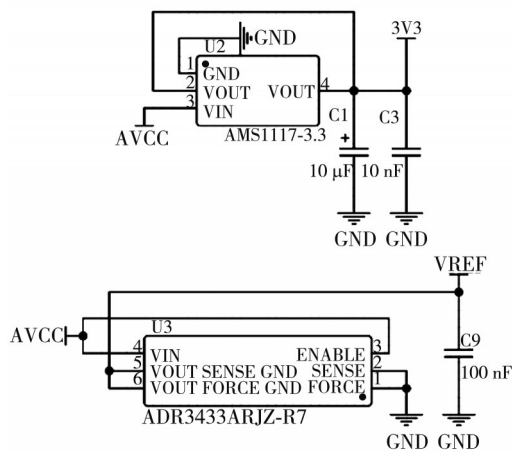
$$V_{OUT_T} = R4 \left[\frac{1}{R5} \times \frac{R1}{R1 + R2} \times (V_{IN} - VGND) + \frac{1}{R6} \times VGND \right]。 \quad (4)$$

1.3 ADC采集电路设计

本文设计的ADC采集电路包括芯片供电模块、基准电压模块和AD7928芯片。采集电路原理图如图4所示。



(a) AD7928芯片



(b) ADC芯片驱动电压供电电路与基准电压电路

图4 ADC采集电路原理图

Fig. 4 Block diagram of the ADC acquisition circuit

图4(a)为本系统所选取的AD7928芯片,采用5 V单电源工作,模拟输入范围为0~3.3 V,与主控之间进行SPI串行通信;图4(b)为ADC芯片驱动电压供电电路与基准电压电路。

1.4 采集系统误差来源

信号采集系统的系统误差主要有两大来源,信号采集电路引起的误差和信号调理电路引起的误差^[7]。信号采集电路引起的误差包括ADC自身的偏移误差和增益误差。信号调理电路的误差主要由电阻精度误差和运算放大器失调电压引起^[8-10]。电阻精度误差会导致信号在调理电路第一级信号拾取电路上的损耗,使得信号失真,以

及造成三级减法电路的增益改变。运算放大器失调电压会引起二级电压跟随电路与三级减法电路输出电压的偏大或偏小。本文中的误差标定分析主要是针对系统误差进行的标定分析。

2 信号采集系统误差标定与分析

2.1 ADC采集电路误差分析与校准

ADC芯片的偏移误差和增益误差会造成转换结果的整体偏大或偏小以及转换曲线斜率的偏差。理想ADC转换输出值 V_{OUT} 与输入值 V_{IN} 关系为

$$V_{OUT} = V_{IN}。 \quad (5)$$

实际ADC转换中,由于偏移误差和增益误差的存在,实际转换曲线与理想转换曲线存在一定的误差,实际ADC转换输出值 v_{out} 与输入值 v_{in} 关系为

$$v_{out} = m \times v_{in} + n, \quad (6)$$

式中: m 为增益误差项; n 为偏移误差项。

本文设计多点电压值采集法,在0~3.3 V之

间均匀取22个电压值点,供给AD7928进行采集。通过一台六位半高精度数字万用表测量流入ADC采集电路模拟通道的电压,得到实际输入电压,再控制ADC采集电路对每个电压值连续采集100次,作数字滤波处理取其平均值,得到ADC实际采集值,并求出相对误差值如表1所示。

表1 各点未校准相对误差值

Tab. 1 Uncalibrated relative error values of each point

实际输入值/V	实际采集值/V	相对误差/%	实际输入值/V	实际采集值/V	相对误差/%
0.000 00	0.000 00	0.000 00	1.996 12	1.995 97	0.007 41
0.016 40	0.016 83	2.644 58	2.245 89	2.244 97	0.040 63
0.046 66	0.047 37	1.540 19	2.495 11	2.495 21	0.004 28
0.096 52	0.096 97	0.469 60	2.745 28	2.745 07	0.007 34
0.246 55	0.246 36	0.076 48	2.994 93	2.994 04	0.029 50
0.496 61	0.496 52	0.018 07	3.245 12	3.245 22	0.003 39
0.746 68	0.746 70	0.002 89	3.254 87	3.254 54	0.009 97
0.996 29	0.996 18	0.010 48	3.265 15	3.265 32	0.005 35
1.246 34	1.246 22	0.009 35	3.274 94	3.274 93	0.000 04
1.496 45	1.496 21	0.015 97	3.285 19	3.285 15	0.001 07
1.746 56	1.746 72	0.009 58	3.292 75	3.292 53	0.006 59

由表1可以看出,在小电压0~0.1 V范围内,ADC采集相对误差偏大,不满足本系统全电压范围内ADC采集相对误差不高于千分之五的要求,故对0~0.5 V输入电压进行增益校准以保证校准数据的可靠性。根据上文中误差源分析得出,ADC采集电路的误差主要由增益误差引起,即 m 不等于1, n 等于0。假设输入电压值为 V_{IN}^i ,采集电压值为 V_O^i ,则对应的增益校准系数 m_i 为

$$m_i = V_{IN}^i / V_O^i, \quad (7)$$

实际增益校准系数 m 为

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}. \quad (8)$$

0~0.5 V范围内经过增益校准的ADC采集值与相对误差值如表2所示。

表2 0~0.5 V增益校准结果

Tab. 2 0~0.5 V gain calibration results

实际采集值/V	增益校准值/V	校准后相对误差/%
0	0	0
0.016 83	0.016 39	0.010 76
0.047 37	0.046 65	0.000 11
0.096 97	0.096 50	0.010 65
0.246 36	0.246 51	0.016 03
0.496 52	0.496 52	0.018 07

0~0.5 V范围内经过增益校准的相对误差与未校准的相对误差对比如图5所示,蓝色线条为未校准的相对误差,红色虚线为校准后的相对误

差,由图可以看出,增益校准后的相对误差明显低于千分之五,满足本系统的要求。

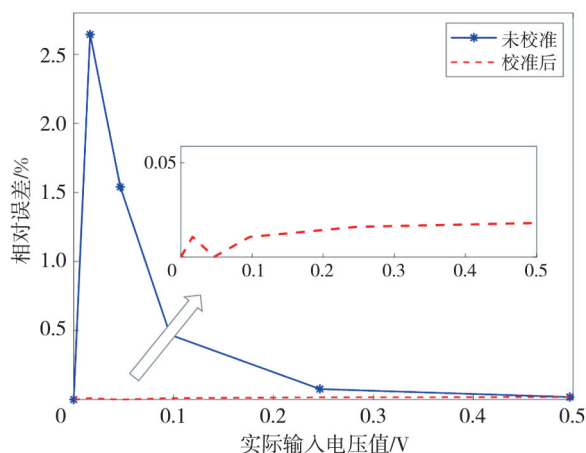


图5 相对误差对比图

Fig. 5 Relative error comparison chart

2.2 调理电路误差分析与模块化标定

2.2.1 调理电路误差分析

信号调理电路中所选用的电阻存在一定的精度误差,运算放大器存在失调误差,会造成信号调理电路输出的实际电压存在一定的偏差。假设三级调理电路中电阻标称值分别为 $R1 \sim R6$,对应的电阻误差值为 $R_{cor1} \sim R_{cor6}$,二、三级运算放大器失调电压为 $V_{offset1}$ 和 $V_{offset2}$ 。本文只对调理电路的系统误差进行分析,因此由式(4)得到调理电路实

实际输出电压 V_{OUT_k} 与输入电压 V_{IN} 关系为

$$\begin{cases} V_{OUT_k} = A \times [(B \times V_{IN} \pm V_{offset1}) + C \times VGND] - \\ D \times VGND \pm V_{offset2}, \\ A = R4 + R_{cor4}, \\ B = \frac{1}{R5 + R_{cor5}} \times \frac{R1 + R_{cor1}}{(R1 + R_{cor1}) + (R2 + R_{cor2})}, \\ C = \frac{1}{R6 + R_{cor6}}, \\ D = \frac{R4 + R_{cor4}}{R3 + R_{cor3}}, \end{cases} \quad (9)$$

式中: A 与 C 为三级减法电路的同相输入系数; D 为减法电路的反相输入系数, 由 $R3 \sim R6$ 的实际阻值决定, B 为一级电压拾取电路的拾取系数, 由 $R1$ 、 $R2$ 的实际分压比得到。电阻阻值精度为 1%, 运算放大器失调电压典型值为 2 mV。由式(4)和式(9)可以求出理论输出与实际输出之间的误差为

$$Eorr = V_{OUT_T} - V_{OUT_k} \quad (10)$$

由式(10)对各误差项求偏导, 可得出当输出误差最大时实际输出电压与输入电压的关系为

$$V_{OUT_k} = 0.2082 \times V_{IN} + 0.01604 \quad (11)$$

当调理电路输入端输入 10 V 电压时, 输出误差达到了 4.9%, 远低于本系统对精度的要求, 因此需要对调理电路进行标定校准。

2.2.2 调理电路模块化标定

传统标定方法是对元器件进行逐个标定, 利用高精度万用表对电阻进行逐个测试, 测出每个电阻较为精确的阻值, 然后进行电阻配对使其达到较为理想的分压比, 或是在运放前端输入标准电压, 在运放输出端进行测量, 得出运放的失调误差, 输入补偿电压^[11]。

传统单个元器件标定方法步骤繁琐, 器件配对困难, 电路复杂, 并且多次标定、多次测量引入了较大的测量误差。本文设计了模块化标定方案, 采用的标定思路是从调理电路输入端 O 点输入 5 组不同电压值, 同时利用高精度万用表分别测量对应的 O 点实际输入值 U_{IN} 与 P 点实际输出值 U_R , 将一个通道的调理电路看作一个模块进行标定。测量点位如图 6 所示。

根据式(9)与式(11)可以得出调理电路实际输出误差主要由电阻阻值误差和运算放大器失调电压产生, 调理电路确定后理论输出电压与实际输出电压呈线性关系, P 点电压理论输出值 V_T 与

实际输出值 V_R 关系可以表示为

$$V_T = a_1 V_R + a_0, \quad (12)$$

式中: a_1 为标定系数; a_0 为标定电压, 由组成调理电路的电阻阻值误差与运算放大器的失调电压决定。

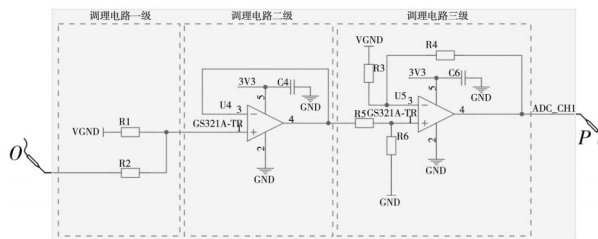


图 6 测量点位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the measurement point

根据上文输入不同电压值测量得到的多组 P 点实际输出值 U_R 与对应的理论输出值 U_T , 利用最小二乘法, 通过求出损失函数最优解得到 a_1 、 a_0 的值。损失函数式为

$$J(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^n (U_T^{(i)} - a_0 - a_1 U_R^{(i)})^2. \quad (13)$$

求解式(13)得

$$a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n U_R^{(i)} U_T^{(i)} - \sum_{i=1}^n U_R^{(i)} \sum_{i=1}^n U_T^{(i)}}{n \sum_{i=1}^n U_R^{(i)2} - \left(\sum_{i=1}^n U_R^{(i)} \right)^2}, \quad (14)$$

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n U_T^{(i)} \sum_{i=1}^n U_R^{(i)2} - \sum_{i=1}^n U_R^{(i)} U_T^{(i)} \sum_{i=1}^n U_R^{(i)}}{n \sum_{i=1}^n U_R^{(i)2} - \left(\sum_{i=1}^n U_R^{(i)} \right)^2}. \quad (15)$$

根据以上步骤对五路调理通道进行标定计算, 标定结果如表 3 所示。

表 3 五路调理通道标定结果

Tab. 3 Calibration results of five-way conditioning channels

	a_1	a_0
第一路	1.019 48	0.002 51
第二路	1.020 83	0.001 89
第三路	1.022 07	0.002 75
第四路	0.987 02	-0.001 38
第五路	1.028 81	0.001 10

3 实验结果分析

实验平台如图 7 所示, 由直流电源为引信电路板与采集系统供电, 主控为 STM32L 系列单片机, PC 端负责与采集系统通信, 同时利用示波器

单次触发模式观测同一路实际输入信号波形。引信电路板上在 $0.47\ \mu\text{F}$ 的储能电容之前有一对并联的 $500\ \Omega$ 电阻,因此电容的充电常数为 $11.75\ \text{ms}$,可认为 $60\ \text{ms}$ 内可将电容充满。故本系统采集时间设为 $100\ \text{ms}$ 足够采集电容充电波形,对引信电路板的信号激励时间也设为 $100\ \text{ms}$ 。

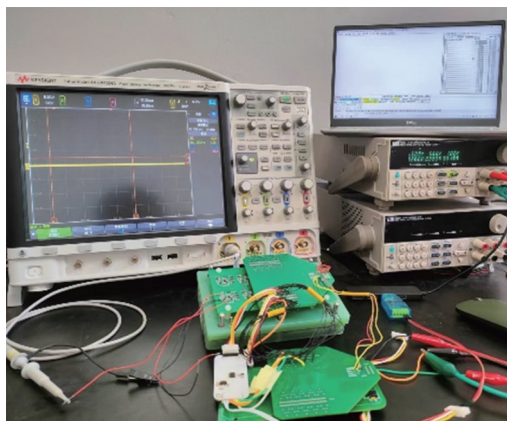


图7 实验平台图

Fig. 7 Experimental platform diagram

实验开始前对引信电路板与采集系统供 $15\ \text{V}$ 和 $5\ \text{V}$ 电压,实验开始后由PC端发送采集指令开始信号采集,示波器采集到的电容充电波形如图8所示。采集完成后PC端接收ADC采集数据。

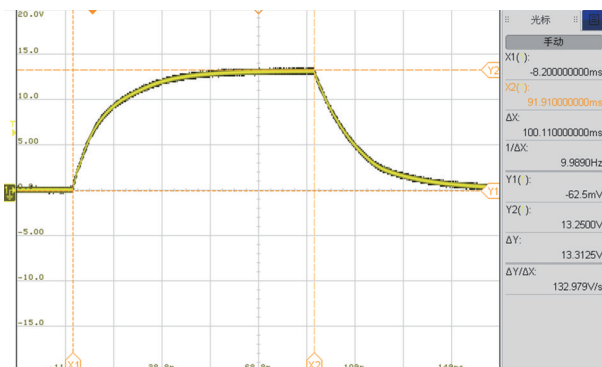


图8 输入信号波形图

Fig. 8 Input signal waveform

采集系统采样率为 $1\ \text{kHz}$,示波器采样率为 $10\ \text{kHz}$,利用MATLAB对采集系统采集得到的数据进行处理,对比分析采样数据与真实数据,得到对比波形如图9所示。由图中可以看出,经过校准的采集数据能够精确地复现原始波形,且 $60\ \text{ms}$ 之后电压趋于稳定,符合理论分析,信号相位未滞后,信号波形未失真,信号精度较未校准数据有明显改善,并且明显优于利用STM32内部ADC采集得到的结果。

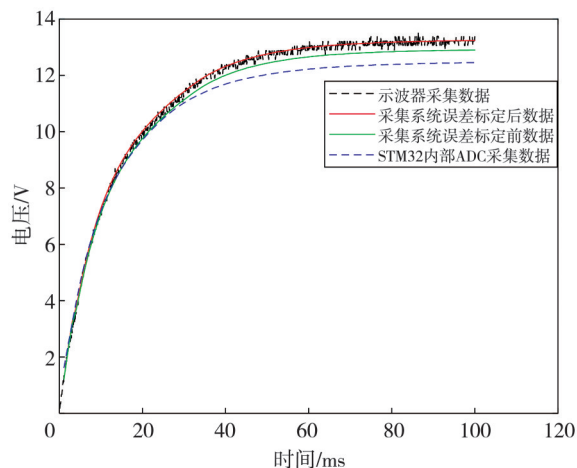


图9 波形对比图

Fig. 9 Waveform comparison chart

4 结论

本文设计了多路高压非共地信号采集电路和与调理电路,分析了本采集系统的误差源;建立了信号调理电路和模数转换电路的误差模型,提出的增益误差校准算法解决了信号采集电路在小电压范围内相对误差过大的问题,保证了全电压范围内的测量精度。同时,提出了信号调理电路软件标定算法,通过模块标定技术,采用最小二乘法求出标定最优解,实现了对信号调理电路的软件校准,解决了因分压电阻阻值误差、运放失调电压产生的误差问题。经过多次实验验证表明本系统能够实现多通道信号采集功能,能够精确复现实际信号波形,全电压范围内的相对误差不超过百分之一,信号精度较未校准数据有明显改善,并且信号相位未滞后。同时,在动态信号采集方面有着良好的表现,对比传统的利用高采样率进行多点采集的平均值滤波的动态信号采集方法,本采集系统能以低成本、低采样率ADC芯片单点采集方案实现动态信号高精度采集。因此,本文设计的多通道信号采集系统在成本、精度和工程实用性方面具有一定的优势。

参考文献:

- [1] 李卫强,朱加雷,焦向东,等. 高压干法水下熔池惰性气体保护电弧声数据收集与分析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(3): 323-325.
LI Weiqiang, ZHU Jialei, JIAO Xiangdong, et al. Arc sound acquisition and analysis of hyperbaric underwater MIG welding [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(3): 323-325. (in Chinese)

- [2] 屠晓伟, 俞润超, 杨庆华. 基于STM32和USB的多通道数据采集系统设计与实现[J]. 自动化仪表, 2020, 41(5): 84-87.
TU Xiaowei, YU Runchao, YANG Qinghua. Design and Implementation of multi-channel data acquisition system based on STM32 and USB [J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41 (5) : 84-87. (in Chinese)
- [3] 李光福, 南钢洋, 潘冬阳, 等. 激光雷达测风系统信号采集处理研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50 (S2): 188-194.
LI Guangfu, NAN Gangyang, PAN Dongyang, et al. Research on signal acquisition and processing of lidar wind measurement system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(S2): 188-194. (in Chinese)
- [4] 严明, 李刚, 郭明安, 等. 微电流信号的高带宽调制技术及应用[J]. 电子学报, 2017, 45(9): 2292-2295.
YAN Ming, LI Gang, GUO Ming'an, et al. High bandwidth signal modulation technique for micro current signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(9): 2292-2295. (in Chinese)
- [5] 肖璟博, 陈敏, 刘云涛, 等. 水质监测传感器数据采集节点的设计和实现[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(7): 1446-1452.
XIAO Jingbo, CHEN Min, LIU Yuntao, et al. Design and implementation of sensor data acquisition node for water monitoring[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51 (7) : 1446-1452. (in Chinese)
- [6] 李维波. 嵌入式系统中的典型模拟信号处理技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [7] 如何在STM32微控制器中获得最佳ADC精度[EB/OL]. [2018-05-27]. https://www.st.com/resource/zh/application_note/an2834-how-to-get-the-best-adc-accuracy-in-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf.
- [8] 李跃峰. 采用高线性度低功耗级间放大器的Pipeline-SAR ADC设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [9] 南钢洋, 王彦瑜, 张建川, 等. 核物理实验中模数转换器选型及其供电方案[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 471-474.
NAN Gangyang, WANG Yanyu, ZHANG Jianchuan, et al. Selection of analog-digital converter in nuclear physics experiments and its power supply solution[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 471-474. (in Chinese)
- [10] 许江涛, 闫创, 段颖哲, 等. 用于植入式医疗设备的低功耗低位逐次逼近型模数转换器[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 12-19.
XU Jiangtao, YAN Chuang, DUAN Yingzhe, et al. Low power and least significant bit-first successive-approximation analog-to-digital converter for implantable medical devices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 12-19. (in Chinese)
- [11] 李爽玉, 冯荣尉, 贾冬宇, 等. 一种静电计运算放大器测试电路设计[J]. 宇航计测技术, 2023, 43(1): 61-67.
LI Shuangyu, FENG Rongwei, JIA Dongyu, et al. A test circuit design of electrometer operational amplifier [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2023, 43(1): 61-67. (in Chinese)