

文章编号: 1671-7449(2026)03-0317-10

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(3): 317-326.

基于FPGA的多通道 $\pm 1\ 000\ \text{V}$ 直流电压 采集测试板卡设计

聂星星, 洪应平*, 国 胜

(中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对工业测试系统领域对同时测量多通道直流高电压信号参数的需求, 设计了一款多通信接口多通道高精度高电压采集测试系统。系统采用以现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)为中心的逻辑控制器, 支持16路电压信号输入, 支持千兆以太网、LVDS、RS422三种接口进行数据交互, 配备上位机软件实现人机交互, 通过上位机对采集的数据进行实时监测和保存。系统通过串联多个高精度采样电阻将高电压按比例降低到安全的低电压后进行后续的测量和处理, 使用AD824ARZ-14运放对分压后的电压进行跟随, 以FPGA作为主控单元, 使用分辨率为16位的A/D转换器AD7616BSTZ对电压进行采集。经实际工程验证, 该系统可以实现高精度测量16路范围为 $-1\ 000\sim 1\ 000\ \text{V}$ 的直流电压信号, 信号采样频率为 $20\ \text{Hz}\sim 1\ \text{kHz}$, 参数测量误差小于 0.1% , 并能通过3种通信接口实现数据交互, 可通过上位机对数据进行准确记录, 满足设计要求, 为工业上对直流高电压的优化设计提供了重要参考。

关键词: 现场可编程门阵列; 多通道; 多通信接口; 电压测量; 电压校准

中图分类号: TN710

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026031

引用格式: 聂星星, 洪应平, 国胜. 基于FPGA的多通道 $\pm 1\ 000\ \text{V}$ 直流电压采集测试板卡设计[J]. 测试技术学报, 2026, 40(3): 317-326.

NIE Xingxing, HONG Yingping, GUO Sheng. Design of multi-channel $\pm 1\ 000\ \text{V}$ DC high voltage acquisition and test board based on FPGA[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(3): 317-326.

Design of Multi-Channel $\pm 1\ 000\ \text{V}$ DC High Voltage Acquisition and Test Board Based on FPGA

NIE Xingxing, HONG Yingping*, GUO Sheng

(State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the demand of an industrial test system for simultaneous measurement of multi-channel DC high-voltage signal parameters, a multi-communication interface multi-channel high-precision high voltage acquisition test system is designed. The system adopts a logic controller centered on a field programmable gate array (FPGA), and supports 16 voltage signal inputs. The system supports Gigabit Ethernet, LVDS and RS422 interfaces for data interaction, and is equipped with host computer software to realize human-computer interaction, and the collected data is saved by the host computer. The system

【收稿日期】2025-03-25

【基金项目】山西省基础研究计划资助项目(202303021221111)

【作者简介】聂星星(2000—), 男, 硕士生, 主要从事电路与系统研究。E-mail: niexingxing_2000@163.com。

*【通信作者】洪应平(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事极端环境下测试技术及仪器研究。E-mail: hongyingping@nuc.edu.cn。

reduces the high voltage proportionally to a safe low voltage for subsequent measurement and processing by connecting multiple high-precision sampling resistors in series, uses an AD824ARZ-14 op amp to follow the voltage after voltage division, uses FPGA as the main control unit, and uses an AD7616BSTZ A/D converter with a resolution of 16 bits to collect voltage. Verified in actual engineering projects, the system can achieve high-precision measurement of 16 DC voltage signals ranging from $-1\ 000\text{ V}$ to $1\ 000\text{ V}$, with a signal sampling frequency of $20\text{ Hz}\sim 1\text{ kHz}$ and a parameter measurement error of less than 0.1% . It can also realize data interaction through three communication interfaces and accurately record the data through the host computer, meeting the design requirements of the task book and providing an important reference for the industrial optimization design of DC high voltage.

Key words: field programmable gate array (FPGA); multi-channel; multi-communication interface; voltage measurement; voltage calibration

0 引言

随着现代工业和电力系统对高压测量精度和实时性以及多通道测量要求的不断提高,工业界对直流高压测量系统提出了更为严苛的要求^[1]。在智能电网调度中心,运维人员需要实时监控数以千计的高压节点状态;在电动汽车超级充电站,电池管理系统要求对模组电压进行毫秒级同步检测;而在大功率变频器生产线,测试设备必须能在 500 V/m 电磁干扰环境下保持微伏级测量精度。这些应用场景共同指向 3 个核心技术需求:在 $\pm 1\ 000\text{ V}$ 范围内实现优于 0.1% 的测量精度,支持 16 通道以上的并行采集能力以及具备多协议实时通信功能^[2-4]。

国内外对高电压多通道采集系统的研究主要集中在高精度模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)、数字隔离等方面。当前主流设备如 Keysight 34980A 虽在实验室环境下可达 0.02% 精度,但其庞大的机架式结构无法嵌入工业现场设备,且仅支持 8 通道扩展,通信接口单一(仅 GPIB/RS232)、抗干扰能力弱;国产的 HIOKI PW 8001 虽将通道数提升至 16 路,却在 1 kHz 以上频段出现 0.3% 的频响误差,更因缺乏工业级电磁兼容性(Electromagnetic Compatibility, EMC)防护而难以在变电站等复杂环境中稳定工作^[5-10]。

针对上述问题,本文设计了一种基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的高精度多通道多通信接口直流高电压采集系统,构建了基于 FPGA 的分布式采集架构,并成功服务于实际直流高电压采集。试验结果表

明,本设计能够实现多通信接口的 16 路并行直流高电压测量,在 $1\ \mu\text{s}$ 时间窗内完成 16 通道真同步采集,直流高电压的范围为 $-1\ 000\sim 1\ 000\text{ V}$,直流高电压频率测量范围为 $20\text{ Hz}\sim 1\text{ kHz}$,且参数测量误差均小于 0.1% ,并能通过配套的上位机将采集的高电压数据进行实时显示和储存,方便工程应用上的数据处理和分析。

1 系统设计方案

根据实际指标设计要求,最终确定了采用 Xilinx 公司 Spartan6 系列 FPGA 作为板卡主控,具体型号为 XC6SLX45-2FTG484。板卡采用 $12\sim 24\text{ V}$ 直流电源供电,并且板载 DC~DC 电源变换芯片,能够提供所需的一 12 、 12 、 5 、 3.3 和 1.2 V 电源,以保证板卡芯片和运放跟随电路的正常工作。此外,板卡还支持 RS422、LVDS 和以太网 3 种接口,实现了与其他设备的数据及指令交互,可按实际应用情境灵活地选配适合的接口,与传统测试仪相比,数据通信更加多样,可通过上位机对数据进行实时显示和存盘处理,方便工程应用上的数据处理和分析。利用高精度采样电阻组成的电压分压电路将直流高电压转化成适合 A/D 芯片采集的直流低电压;以 AD824ARZ-14 芯片为核心的电压跟随器用以接收各路模拟信号,并对这些模拟信号进行跟随处理后再传递至 A/D 转换电路,从而充分提升电压信号采样精度。通过 SPI 串行接口控制 A/D 转换芯片 AD7616BSTZ,AD7616BSTZ 芯片的分辨率为 16 位以提高测试仪的采样精度,一片 AD7616BSTZ 芯片采集 16 路模拟量,较传统直流高电压测试仪,能实现对多路直流高电压信号的采集。系统总体框图如图 1 所示。

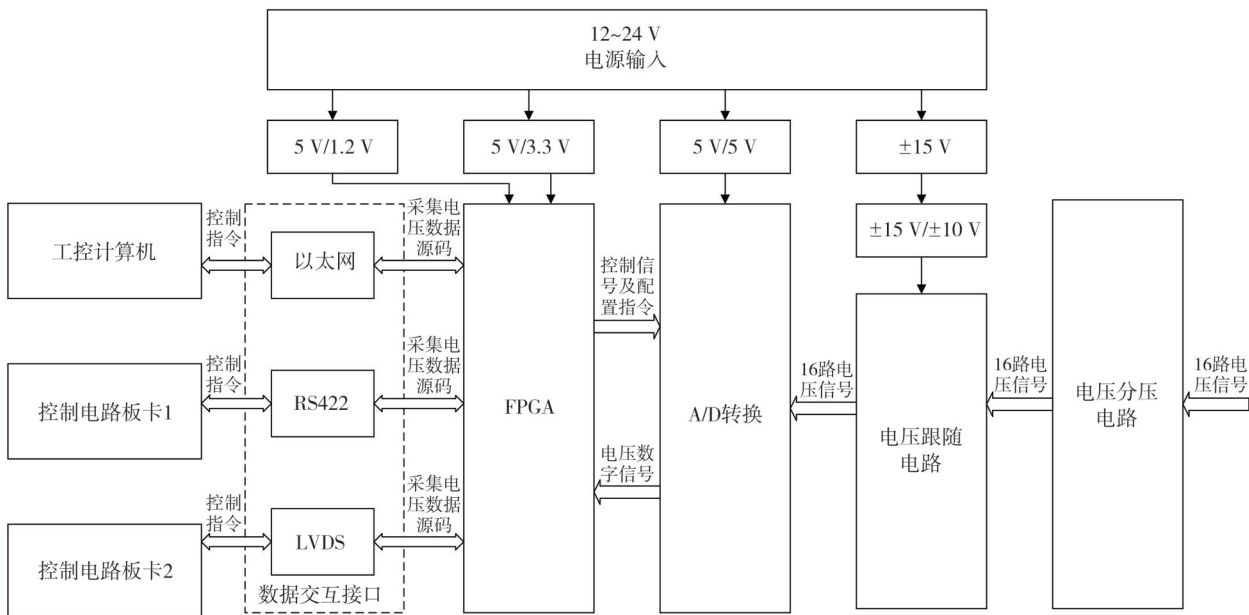


图 1 系统总体框图

Fig. 1 Overall system block diagram

2 关键硬件电路设计

2.1 电源模块设计

一个稳定可靠的电源是保证板卡正常工作的必要条件,因此,在对板卡电源部分进行设计时,需要考虑调试以及实际使用过程中可能出现的电源反接、后级器件短路、电源电压波动等意外情况,并有相应的防护电路设计,确保板卡不会因此而无法正常工作甚至损坏。

在本直流高电压采集板卡中,电压跟随电路需要 $\pm 12\text{ V}$ 的双电源供电,A/D转换芯片需要 5 V 供电,主控FPGA需要 3.3 V 供电。板卡电源采用两级稳压结构,如图2所示,第一级使用DC-DC开关稳压芯片TPS5430将 24 V 输入电压转换为 $+5\text{ V}$ 电压,供 5 V 器件使用。

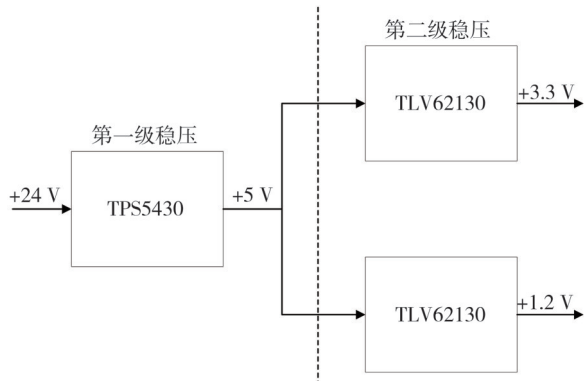


图 2 板卡稳压电路结构

Fig. 2 Structure of board voltage regulator circuit

第二级由2个TLV62130RGT芯片分别将 5 V 电压再次转换为 $+3.3\text{ V}$ 和 $+1.2\text{ V}$,供FPGA及其他器件使用。电压跟随电源采用两级结构,如图3所示,第一级使用DC-DC开关电源模块WRA1212MH-10W将 24 V 输入电压转换为 $\pm 15\text{ V}$ 电压,第二级分别通过LM7812芯片将 15 V 电压转换为 12 V ,通过LM7912芯片将 -15 V 电压转换为 -12 V ,供运放AD824ARZ-14使用。

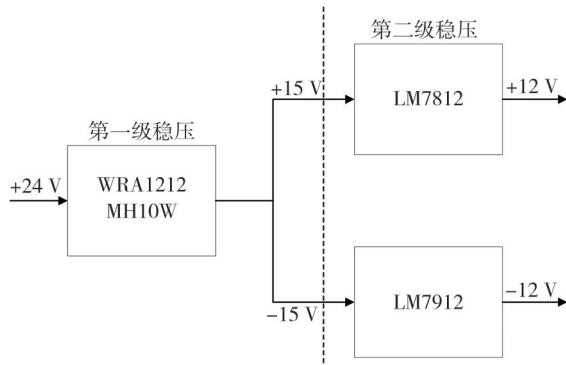


图 3 电压跟随稳压电路结构

Fig. 3 Structure of voltage-following regulator circuit

通过上述设计,电源模块具有多种内置保护功能,如短路保护、过温保护、欠压保护等,可确保系统的稳定运行,同时进一步提高了系统的可靠性和安全性^[11-13]。

2.2 FPGA逻辑架构设计

如图4所示的FPGA逻辑架构中, System模块作为核心控制器,为ADC_Controller、Link-Packet、AD7616和ETH模块提供精准时钟和可

靠复位信号。其中,AD7616模块通过SPI接口配置ADC芯片寄存器,实现模拟信号的高精度采样与转换;ADC_Controller模块动态调整AD7616的采样范围和采样频率;LinkPacket模块将转换

后的数字信号按照自定义帧协议(含同步头、时间戳和CRC校验)进行标准化封装;最终,ETH模块通过千兆以太网接口与上位机建立高速数据通道,实现采样数据的实时传输与远程监控。

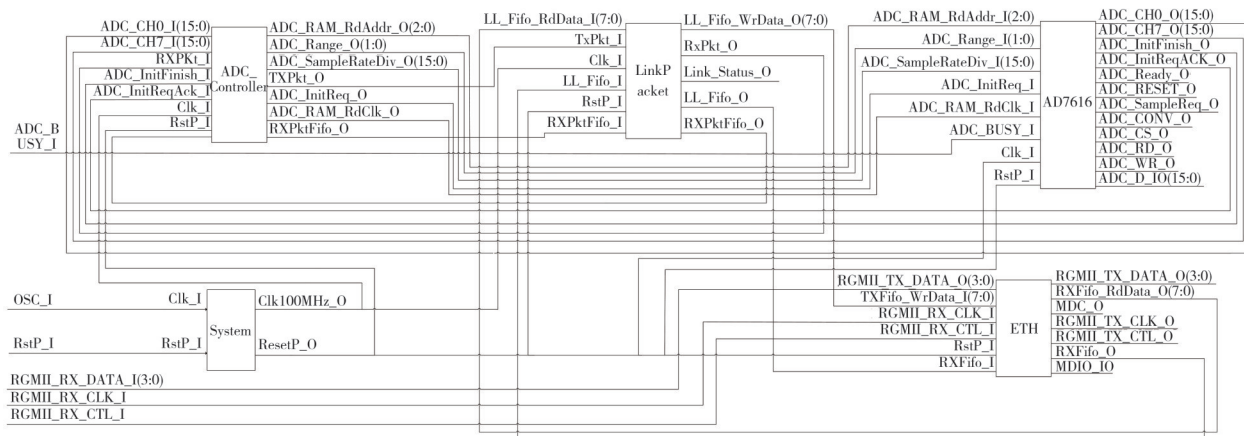


图4 FPGA逻辑架构图

Fig. 4 FPGA logic architecture diagram

2.3 A/D转换电路设计

在直流高电压采集板卡中,模数转换电路属于其核心组成部分,该部分电路的转换精度对板卡整体的电压采集精度起着关键作用^[14],因而在元器件选型时,尤需关注A/D芯片的选型。本设计要求直流高电压分压后的电压输入信号为16路,模拟量信号的电压分布于 $[-10\text{ V}, 10\text{ V}]$ 区间,此外,还需考虑诸如芯片的体积和功耗,及系统的各项指标等问题,对此,本设计在A/D转换电路部分选用AD7616BSTZ芯片进行搭建。作为一款ADC芯片,AD7616BSTZ具有16位的分辨率,提供了对50 MHz标准并行SPI接口的支持,各接口易于使用,软硬件设计简便。每片AD7616BSTZ支持对16个通道进行双路同步采样,在5 V单电源的条件下工作,能够接收 $\pm 10\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 以及 $\pm 2.5\text{ V}$ 真双极性信号并对其进行处理,此外,各通道均可实现1 MS/s的吞吐速率和90.5 dB信噪比采样。AD7616BSTZ仅需单电源上电,内置滤波模块,并具有高输入阻抗,由此AD7616BSTZ将不依赖于外部双极性电源,也无需驱动运算放大器,其电路原理图如图5所示。

AD7616的读时序图如图6所示,采样结束后BUSY信号置低,采样保持器返回跟踪模式,这时FPGA可以通过拉低CS和RD,将转换后的数据输出到数据总线DB15至DB0来并行读取数据,BUSY信号置低时,CS、RD信号同时置低,开始从低到高回读第1路转换数据,之后拉高再次置

低可回传第2路数据。

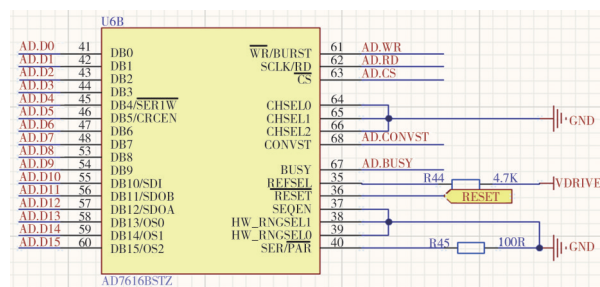


图5 A/D转换电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of A/D conversion circuit

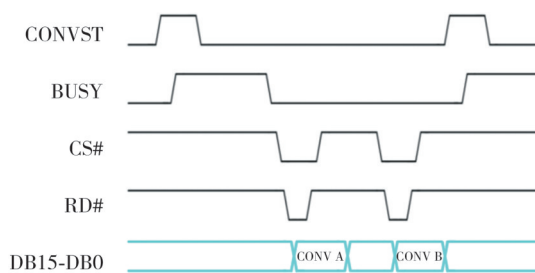


图6 回读转换数据时序图

Fig. 6 Read back and convert data sequence diagram

本系统的输入电压区间为 $[-10\text{ V}, 10\text{ V}]$,有着20 V的输出跨度,考虑到提高输入信号的精度以及隔离和缓冲问题,需在A/D电路输入端增设一个电压跟随电路^[15-19],本系统需接收16路的模拟信号输入,因而需增设4个围绕着AD824ARZ-14芯片搭建的电压跟随器,图7展示了该电压跟随器的电路组成。

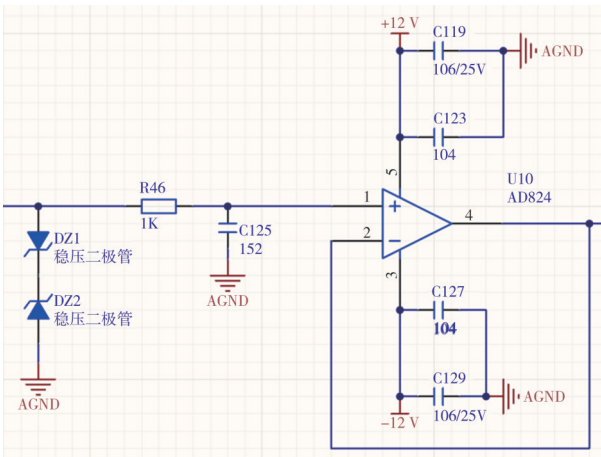


图 7 电压跟随电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of voltage following circuit

在跟随电路的输入端配置双向过压保护电路,采用两只稳压二极管构建过压保护。当输入高压异常超过±12 V时,二极管迅速导通形成低阻通路,将分压网络前端电压严格限制在±10.5 V安全阈值内(含0.5 V正向压降裕量),确保分压后输出至电压跟随器的最大信号幅值稳定在±9.9 V。此设计通过硬件级快速响应(动作时间<10 ns)有效抵御瞬态浪涌冲击,在保障±1 000 V量程测量精度的同时,为后级精密运放AD824ARZ-14及16位ADC芯片AD7616BSTZ提供可靠的过应力防护,提升系统安全性^[20-24]。

2.4 分压电路设计

本系统的板卡耐压需达到1 000 V,可在[-1 000 V,1 000 V]区间中稳定运行,在这种要求下,必须引入相应的电压分压电路。而BWL高精度电阻性能优秀,功率达2 W,精度达0.1%,同时其温度系数为±5 ppm/°C,这些参数满足了本系统的设计要求。该分压电路的原理见图8。

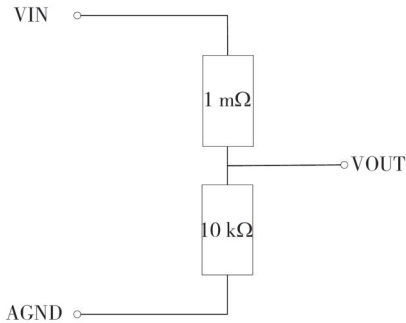


图 8 电压分压电路原理图

Fig. 8 Schematic diagram of voltage divider circuit

2.5 数据通信电路设计

直流高压采集系统的数据交互(包括以太网、RS422以及LVDS这3类接口)涉及工控计算机、上位机(用以存储数据)以及外部系统的板卡,若要顺利搭建起各设备数据交互的桥梁,需配备3路通信电路。其中,千兆以太网接口可采用RTL8211E协议芯片进行搭建,使直流高压采集系统与工控计算机顺利连接通信。RTL8211E的封装风格为方形扁平无引脚封装,不需要引入变压器耦合,充分简化了板卡的硬件设计,使板卡电路更为紧凑,从而更易于安装至壳体中。RS422接口可选用ADM3491协议芯片进行搭建,ADM349的最高串行通信速率可达10 MB/s。最后,可将SN65LVDS388芯片作为核心,搭建起相应LVDS接口的数据接收单元,并采用SN65LVDS389芯片搭建起LVDS接口的数据发送单元。

板卡从外部获取数据包,根据通信协议的源ID来判断数据来源,以太网接口ID为0x10,LVDC接口ID为0x20,RS422接口ID为0x30,进行数据解码后将指令送往脉冲测量逻辑模块,如图9所示。当脉冲测量处理完成后会根据源ID将相应数据返回相应接口,完成多接口数据交互。

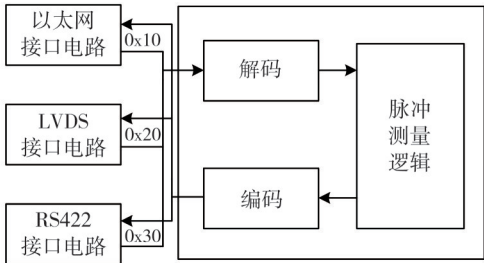


图 9 多通信接口逻辑图

Fig. 9 Multi communication interface logic diagram

2.6 通信协议格式设计

通信协议格式如表1所示。

表 1 通信协议帧格式

Tab. 1 Format of communication protocol frame

帧头	源ID	目标ID	帧类型	数据长度	数据区	帧校验
----	-----	------	-----	------	-----	-----

帧头: 2 B长度, 固定为0XAAAF;
源ID: 指示数据发送端;
目标ID: 指示数据接收端;
帧类型: 指示该帧功能;

数据长度：指示数据区长度，单位为B；

数据区：长度最大为256 B，当数据长度为0时数据区不存在；

帧校验：采用和校验的方式，计算时以字节为单位累加，丢弃高位溢出，只取低8位。

3 电压校准流程设计

3.1 电压校准原理

在本设计中，通过标准电压源向多通道直流高电压采集测试板卡输出已知电压，在多个电压点上进行测量，记录标准电压源的输出值与多通道直流高电压采集测试板卡的测量值，最终通过最小二乘法对输出值和测量值进行拟合以精确描述测量误差。通过误差分析和拟合结果可以修正测试板卡的测量值，并保证其在多个电压点的准确性。标准电压源选用Kewell的EVS-400-1200型号电池模拟器，该电池模拟器能输出24~1200 V的直流电压，精度为0.05%。

AD7616芯片输出电压的关系为

$$V_{\text{out}} = \frac{2V_{\text{ref}}}{2^{16}} \times \text{ADC}_{\text{CODE}}, \quad (1)$$

式中： V_{ref} 为参考电压， $V_{\text{ref}}=10\text{ V}$ ； ADC_{CODE} 为AD7616片内的输入数据寄存器的数据（共16位），每个ADC通道中均包含一个16位数据。采集测试板卡输出电压的关系式为

$$V'_{\text{out}} = V_{\text{out}} / \frac{1}{101}, \quad (2)$$

式中： V_{out} 为AD7616芯片输出电压；1/101为电压分压比。

3.2 电压标定过程

保持25℃的工作环境，标定某输出通道，随后记录标定信息。通过标准电压源向板卡输出一1 000~1 000 V的电压，记录标准源的输出值与采集测试板卡的测试值，结果如表2所示。

电压标定的具体流程如下：

1) 将板卡上电并引出第一输出通道测试线缆至标准电压源；

2) 设置标准电压源的输出电压为50 V，观察采集测试板卡的测试值并记录；

3) 将标准电压源的输出电压配置为100 V，接后观察采集测试板卡所得的测试值，并将测试值记录在表格；

4) 按100 V的步长逐步调整标准电压源输出值，重复执行步骤3)，从而完成50~1 000 V的标定工作；

5) 选择其他不同的输出通道，重复执行上面4个步骤，直至标定全部通道，并在上位机中保存这些数据。

表 2 标准源的输出值与采集测试板卡的测试值记录表

Tab. 2 Record table of output values of standard sources and test values of acquisition test boards

输出值/V	通道1测量值/V	通道8测量值/V	通道16测量值/V
−1 000	−1 002.55	−1 002.50	−1 002.45
−900	−902.35	−902.45	−902.35
−800	−801.98	−801.95	−801.95
−700	−701.82	−701.85	−701.79
−600	−601.50	−601.71	−601.45
−500	−501.40	−501.35	−501.30
−400	−401.36	−401.26	−401.33
−300	−300.93	−300.90	−300.89
−200	−200.65	−200.71	−200.61
−100	−100.49	−100.49	−100.45
100	100.45	100.51	100.49
200	200.53	200.74	200.65
300	300.76	300.92	300.91
400	401.37	401.25	401.35
500	501.30	501.33	501.30
600	601.47	601.72	601.50
700	701.83	701.86	701.81
800	802.03	801.91	801.99
900	902.21	902.45	902.40
1 000	1 002.60	1 002.47	1 002.50

采用最小二乘法对标准源的输出值与采集测试板卡的测试值进行曲线拟合，绘制出曲线并求出曲线的斜率 K 和截距 B ，并将标定的数据保存在上位机中。通道1、通道8和通道16的拟合曲线分别如图10~图12所示。

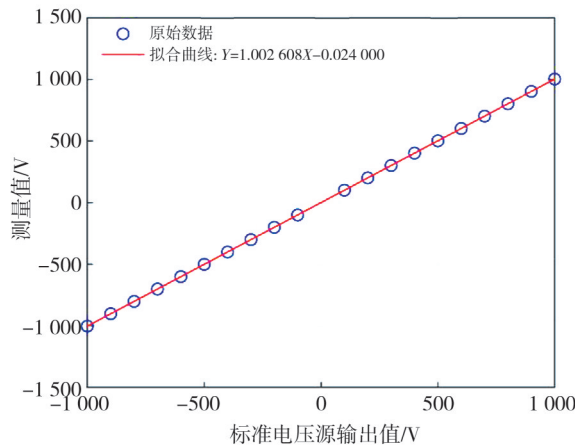
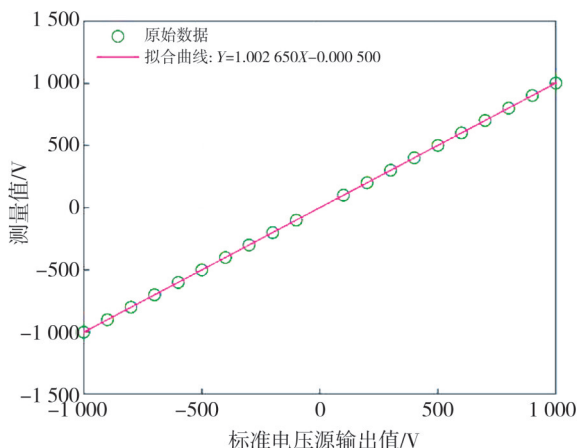
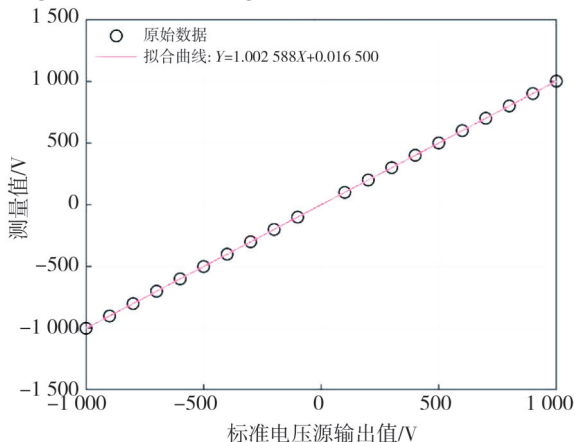


图 10 通道1拟合曲线($K=1.002\ 608$, $B=0.024$)

Fig. 10 Channel 1 fitting curve($K=1.002\ 608$, $B=0.024$)

图 11 通道 8 拟合曲线($K=1.002\ 650$, $B=0.000\ 5$)Fig. 11 Channel 8 fitting curve($K=1.002\ 650$, $B=0.000\ 5$)图 12 通道 16 拟合曲线($K=1.002\ 588$, $B=0.016\ 5$)Fig. 12 Channel 16 fitting curve($K=1.002\ 588$, $B=0.016\ 5$)

4 测试结果与分析

为验证校准的最终效果,在额定测试电压范围 $[-1\ 000\ \text{V}, 1\ 000\ \text{V}]$ 内,采用 $100\ \text{V}$ 步进测试法进行系统验证。

如图 13 所示,实验使用Kewell公司的高精度EVS-400-1200电池模拟器作为标准电压源,其输出电压范围覆盖 $\pm 1\ 200\ \text{V}$,精度优于 $\pm 0.05\%$,可提供高稳定性的直流电压基准。多通道直流高压采集测试板卡的通道1、通道8和通道16作为代表性测试对象,用于评估板卡在不同通道间的测量一致性。

电池模拟器以 $100\ \text{V}$ 为步长,依次输出 $-1\ 000\sim 1\ 000\ \text{V}$ 的标准直流电压,共20个测试点。通过上位机软件实时读取测试板卡对应通道的电压测量值,并自动记录至本地存储文件,确保数据的完整性和可追溯性。将电池模拟器输出的标准电压值作为基准,与测试板卡采集的测量值进行对比分析,计算各测试点的绝对误差(测量

值-标准值)和相对误差(绝对误差/标准值 $\times 100\%$)以评估板卡的测量精度。

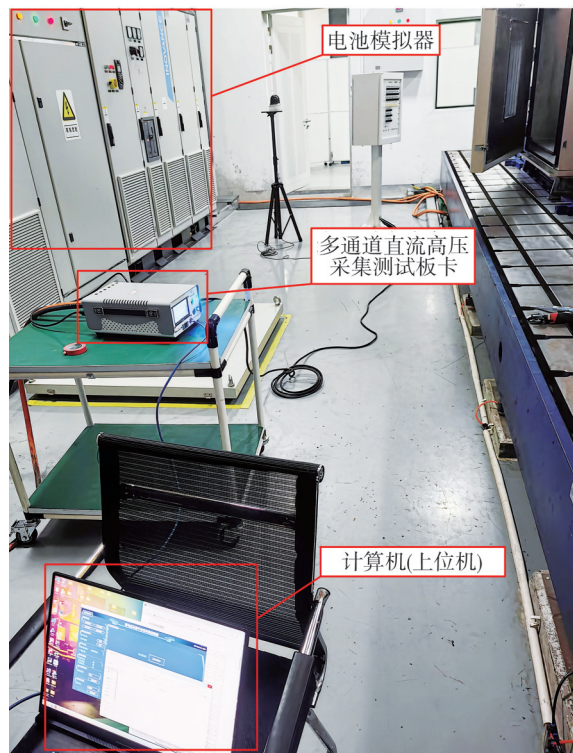


图 13 高电压实验测试环境

Fig. 13 High voltage experimental testing environment

上位机中配备了相应的数据监测软件,该软件的程序使用C#进行编码,并在Visual Studio平台下开发,图 14 展示了该软件的上位机界面。

通过Wireshark网络协议分析工具对多通道直流高压采集测试板卡的以太网通信数据进行抓包解析抓包软件捕获界面如图 15 所示,实验数据显示板卡在 $28.868\ \text{ms}$ 内完成了30次完整的电压数据采集,经计算得出实际采样频率为 $1\ 039\ \text{Hz}$,满足 $1\ \text{kHz}$ 的设计指标,验证了系统在多通道同步采集场景下硬实时性能的可靠性。抓包数据包序列连续完整且循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)零差错,充分表明系统在满足毫秒级同步精度的同时具备优异的通信稳定性和扩展冗余,完全达到工业级高压监测设备对采样速率与数据完整性的严苛要求。

根据表 3 的电压测试数据,分别对通道1、通道8及通道16的离散误差进行计算,并绘制系统误差特性曲线,如图 16 和图 17 所示。

结合图表可知,3个通道的绝对误差在 $\pm 1\ 000\ \text{V}$ 电压范围内均控制在 $\pm 0.5\ \text{LSB}$ 以内,符合高精度的预期性能。本系统在 $[-1\ 000\ \text{V}, 1\ 000\ \text{V}]$ 区间中,

绝对误差和相对误差均表现稳定，所测定的电压误差低于0.1%，满足工业级测量需求。



图 14 上位机界面

Fig. 14 Upper computer interface

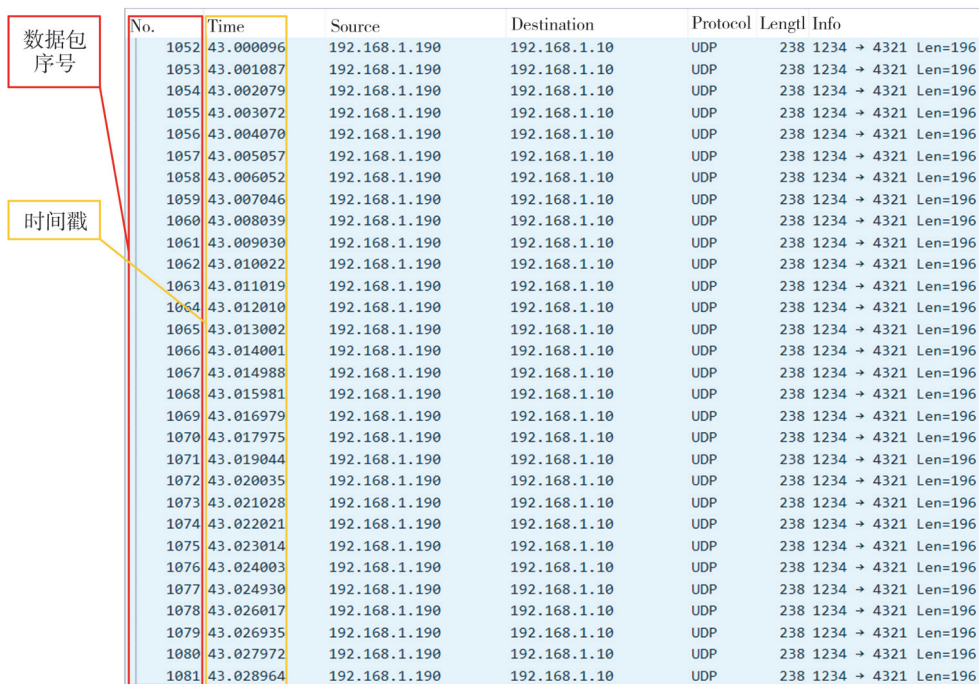


图 15 抓包软件捕获界面

Fig. 15 Capture interface of packet capture software

在工业现场应用中，该板卡已成功集成于某型号高压电源老化测试系统，通过以太网与上位机构建分布式测量网络。实际测试数据显示，在同时接入16个高压监测点时，系统采样率仍能保持1 kHz/s，数据刷新延时控制在5 ms以内。与进口同类设备相比，其采购成本降低50%，维护周期从季度维护延长至年度维护，显著提升了工业测试系统的经济性与可靠性。

当前设计仍存在若干技术局限：其一，通道数量受限于印制电路板布局密度，在需要数百通道级联的超大规模测试场景中，系统集成度仍有提升空间；其二，校准算法虽实现自动化，但依赖于外置高精度基准源，在极端工况下的长期稳定性有待验证；其三，现有通信协议尚未完全兼容工业物联网架构，制约了设备的远程诊断能力。后续研究将针对这些不足，进行研究完善。

表 3 电压测试结果记录表

Tab. 3 Record of voltage test results

输出值/V	通道1测量值/V	通道8测量值/V	通道16测量值/V
−1 000	−999.919	−999.893	−999.860
−900	−899.980	−900.103	−900.020
−800	−799.871	−799.864	−799.881
−700	−699.971	−700.025	−699.982
−600	−599.912	−600.145	−599.903
−500	−500.072	−500.046	−500.013
−400	−400.293	−400.216	−400.303
−300	−300.124	−300.117	−300.124
−200	−200.104	−200.188	−200.105
−100	−100.095	−100.098	−100.085
100	100.093	100.099	100.082
200	200.033	200.199	200.111
300	300.002	300.138	300.111
400	400.350	400.207	400.290
500	500.021	500.027	499.980
600	599.930	600.156	599.920
700	700.029	700.036	699.969
800	799.969	799.826	799.888
900	899.888	900.104	900.037
1 000	1 000.017	999.864	999.877

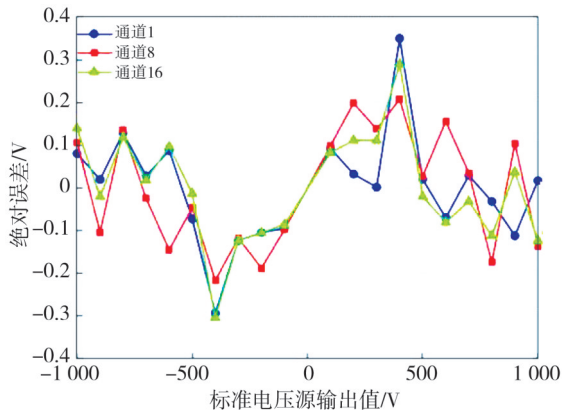


图 16 通道 1/8/16 绝对误差分布曲线

Fig. 16 Absolute error distribution curve of channel 1/8/16

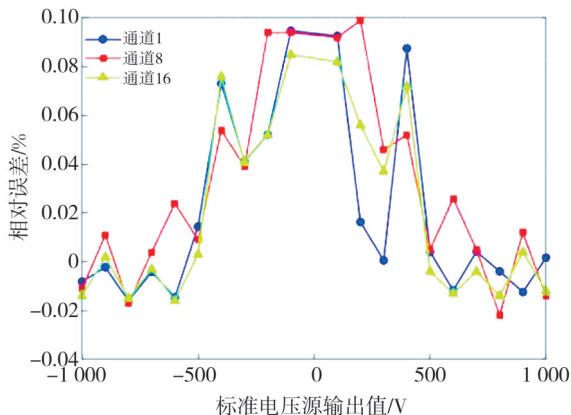


图 17 通道 1/8/16 相对误差分布曲线

Fig. 17 Relative error distribution curve of channel 1/8/16

5 结 论

本文针对在工业自动化测试与高压监测领域,传统多通道直流高压采集设备常面临通道扩

展性不足、测量精度易受环境干扰、校准流程复杂等问题,研究出一种可嵌入至工业现场测试系统的多通道直流高压采集测试板卡,其硬件架构采用模块化设计理念,核心由高精度模拟前端、多级隔离电路与数字化处理单元构成。

工程实践表明,本设计不仅成功解决了多通道高压采集设备在精度、速度、隔离度等方面的技术矛盾,更通过模块化设计形成了可复用的技术平台。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 唐旭, 吴元相, 李登云, 等. 高压直流电能计量系统的误差分析及改进[J]. 武汉大学学报(工学版), 2025, 58(3): 436-443.
TANG Xu, WU Yuanxiang, LI Dengyun, et al. Error analysis and improvement of high voltage direct current power metering system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2025, 58(3): 436-443. (in Chinese)
- [2] 李文瀚. 高压电网过电压数据采集系统的设计研究[J]. 科学技术创新, 2025(4): 5-8.
LI Wenhan. Design and research of overvoltage data acquisition system for high voltage power grid[J]. Scientific and Technological Innovation, 2025(4): 5-8. (in Chinese)
- [3] 汤建华, 王雷兵, 宋波, 等. 基于直流高压测量技术的多功能线路参数测试方法[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(6): 91-94.
TANG Jianhua, WANG Leibing, SONG Bo, et al. Multifunctional line parameter testing method based on DC high voltage measurement technology [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2024, 53(6): 91-94. (in Chinese)
- [4] 蒋涛, 桂纲, 王宏, 等. 基于随机矩阵谱分析的特高压输电通道隐患自动检测方法研究[J]. 测试技术学报, 2021, 35(6): 480-487.
JIANG Tao, GUI Gang, WANG Hong, et al. Research on automatic detection method of hidden danger in UHV transmission channel based on random matrix spectrum analysis[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2021, 35(6): 480-487. (in Chinese)
- [5] 经蕾. 直流高压电源校准方法的研究[J]. 计量与测

- 试技术, 2024, 51(7): 66-69.
- JING Lei. Research on calibration method of DC high voltage power supply[J]. Metrology & Measurement Technique, 2024, 51(7): 66-69. (in Chinese)
- [6] 李韶钦. 基于FPGA的宽量程高精度直流电压测量仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2023.
- [7] 王金阳. 宽频高精度交流电压测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [8] 崔文涛, 李杰, 张德彪, 等. 高过载高精度数据记录仪的设计与实现[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 558-563.
- CUI Wentao, LI Jie, ZHANG Debiao, et al. Design and realization of high-overload and high-precision data recorder [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 558-563. (in Chinese)
- [9] 曹毅睿. 高精度低功耗直流电压测量ADC的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [10] 王新伟, 丁红昌, 曹国华. 基于FPGA的道路标识检测系统设计[J]. 电子测量技术, 2024, 47(4): 113-119.
- WANG Xinwei, DING Hongchang, CAO Guohua. Design of road marking detection system based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4): 113-119. (in Chinese)
- [11] 陈锦河. 基于FPGA的模块化仪表电源设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [12] GAO Y, CHEN X, DUAN Y, et al. Research on the effect of nonlinear variation in insulation resistance on the voltage divider ratio of 2×550 kV DC voltage proportional standard device[J]. Electronics, 2025, 14(1): 138.
- [13] PAŁCZYŃSKI C, OLEJNIK P. An experimental electronic board ADF339 for analog and FPGA-based digital filtration of measurement signals [J]. Electronics, 2024, 13(4): 805.
- [14] YANG Y, LI X, MENG F, et al. A signal generator for simulating radiation sources based on FPGA [J]. Journal of Instrumentation, 2025, 20(8): T08004.
- [15] WANG S, ZHANG C, ZHAO Q. FPGA-based modelling and embedded real-time simulation of low-voltage DC distribution system with multiple DESs[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 245: 111621.
- [16] ZHANG M, ZHAO Y, HAN Z, et al. A 19 ps precision and 170 M samples/s time-to-digital converter implemented in FPGA with online calibration [J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3649.
- [17] 李丽华. FPGA实现的数字等精度测频仪设计[J]. 电子测试, 2022(21): 29-32.
- LI Lihua. Design of digital equal precision frequency measuring instrument based on FPGA [J]. Electronic Test, 2022(21): 29-32. (in Chinese)
- [18] 石朗杰, 薛萌, 于呈豪, 等. 基于FPGA的高速ADC数据采集系统设计[J]. 软件导刊, 2024, 23(12): 136-142.
- SHI Langjie, XUE Meng, YU Chenghao, et al. Design of high-speed ADC data acquisition system based on FPGA [J]. Software Guide, 2024, 23(12): 136-142. (in Chinese)
- [19] 徐燕, 毛师彬, 汤永东, 等. 基于FPGA的多通道模拟量采集/输出PCI板卡的研制[J]. 测控技术, 2018, 37(12): 119-123.
- XU Yan, MAO Shibin, TANG Yongdong, et al. Design of multi-channel analog acquisition and output PCI card based on FPGA [J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(12): 119-123. (in Chinese)
- [20] 周松江, 王立华, 高世皓, 等. 基于FPGA的等精度多功能频率计的设计[J]. 仪表技术, 2017(3): 1-3.
- ZHOU Songjiang, WANG Lihua, GAO Shihao, et al. Design of multi-functional frequency meter with equal precision based on FPGA [J]. Instrumentation Technology, 2017(3): 1-3. (in Chinese)
- [21] 张亚, 王超, 胡闯, 等. 冲击波超压测试多设备接入上位机软件设计及应用[J]. 计算机工程, 2024, 50(5): 272-278.
- ZHANG Ya, WANG Chao, HU Chuang, et al. Design and application of upper computer software for multiple shock-wave overpressure test devices [J]. Computer Engineering, 2024, 50(5): 272-278. (in Chinese)
- [22] 何进. 基于LabVIEW的多通道控制板供电测试系统设计[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2022, 39(4): 13-17.
- HE Jin. Design of power supply test system for multi-channel control board based on LabVIEW [J]. Journal of Changjiang Institute of Technology, 2022, 39(4): 13-17. (in Chinese)
- [23] 刘林仙, 乔楠楠, 童强, 等. 基于FPGA的USB3.0通信接口设计[J]. 测试技术学报, 2021, 35(3): 261-265.
- LIU Linxian, QIAO Nannan, TONG Qiang, et al. Design of USB3.0 communication interface based on FPGA [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2021, 35(3): 261-265. (in Chinese)
- [24] 杨博, 王强, 吴胜华. 基于FPGA的高精度恒流源系统设计[J]. 电子设计工程, 2024, 32(19): 1-5.
- YANG Bo, WANG Qiang, WU Shenghua. Design of high precision constant current source system based on FPGA [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(19): 1-5. (in Chinese)