

数字示波器直流增益准确度内置校准系统设计

向前¹ 刘洪庆^{1,2} 包思云¹

(1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555; 2. 电子信息测试技术安徽省重点实验室 蚌埠 233010)

摘要: 本文针对数字示波器直流增益准确度校准系统存在系统复杂、效率低的问题,设计了一种高效的内置校准系统。由示波器直接控制校准仪,省去了程控计算机,提高了控制流和数据流的速度;采用微小步距可编程差分放大器,提高了校准的精度;优化了校准算法,绕过了与校准无关的显示处理,直接计算校准参数;设计了高精度内部校准源,并与各种外部校准源的接口进行统一封装。实际测试应用表明,本内置校准系统在满足仪器指标要求的同时,能有效降低系统的复杂性,减小占地空间,缩短校准时间。

关键词: 数字示波器;校准;直流增益准确度;可编程差分放大器

中图分类号: TM935.37 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of built-in DC gain accuracy calibration system for digital oscilloscope

Xiang Qian¹ Liu Hongqing^{1,2} Bao Siyun¹

(1. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China;

2. Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, Bengbu 233010, China)

Abstract: This paper proposes an efficient build-in DC gain accuracy calibration system for digital oscilloscope, in order to substitute it for the conventional PC calibration system, which is complex and inefficient. Using Digital Oscilloscope instead of PC to control the oscilloscope calibrator directly, the system reduces the latency and speeds up its command stream and data stream. Benefiting from the tiny step programmable differential amplifier, the system improves the calibration accuracy. By calculating the calibration parameter according to sampling data directly, the system avoids the time-consuming display processing. A high-precision internal calibrator is designed and the interfaces of it and various external calibrators are unified. The actual application results show that the system can meet the measurement need, at the same time, reduces the complexity and shorten the calibration time.

Keywords: digital oscilloscope; calibration; DC gain accuracy; programmable differential amplifier

1 引言

示波器的电压测量准确度是示波器最重要的技术参数之一^[1],因使用时间、环境等因素,导致示波器内部器件特性发生变化,电压测量准确度会产生偏差,因此必须进行周期性的校准^[2]。

示波器具有多个输入通道,每个输入通道又具有若干个垂直量程档位设置和多种输入阻抗设置,不同的垂直量程档和输入阻抗组合会影响电压测量准确度,因此每种组合都需要单独校准,完成一次校准需要花费很长时间,因此校准效率非常重要^[3-5]。

数字示波器是以直流增益准确度的方式来表示电压测量准确度的^[6],为了提高效率,一般都采用自动程控校准的方法对直流增益准确度进行校准,由计算机分别控制校准

仪和示波器来完成校准过程,调节参数的计算是在计算机上完成的。

从上述流程可以分析出,此方法存在3个缺陷:第一,需要计算机来完成程控功能,系统复杂庞大;第二,示波器测量结果和校准参数,都要通过程控命令来传送,加大了系统延迟,降低效率;第三,在自动程控校准过程中示波器的显示处理不是必须的,浪费处理器资源,延长了校准时间。

目前有多种对仪器校准系统进行优化的方法,如利用VISA和SCPI增加系统的通用性、采用PXI开关模块实现多通道的并行校准、自动生成校准报告提高效率、控制指令执行平台和各型号示波器的控制指令文件相分离提高系统的可扩展性等^[7-11],但对上述缺陷均没有涉及。

针对以上问题,本文提出一种数字示波器直流增益准确度内置校准系统的设计方法,通过程控接口直接与校准

仪相连,数字示波器根据 A/D 采样数据直接计算出校准参数,完成调节电路设置。在简化校准系统的同时,有效提高了直流增益准确度校准的效率。

2 原理

内置校准系统的原理如图 1 和图 2 所示,标准电压由校准仪或内部校准源提供。数字示波器通过程控接口连接校准仪,校准仪的输出通过探头接入示波器的输入通道。

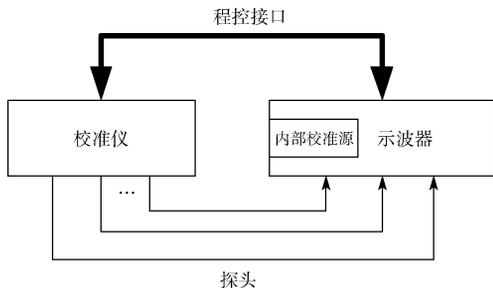


图 1 内置校准系统示意图

数字示波器的 CPU 模块设置好需要校准的通道对应的输入阻抗和垂直量程,控制校准仪或内部校准源输出相应的标准电压信号,CPU 模块读取 ADC 的采集数据后不进行显示处理,根据转换关系,直接与标准电压信号进行比较,得到校准参数。根据此参数,迭代调整直流增益调节器

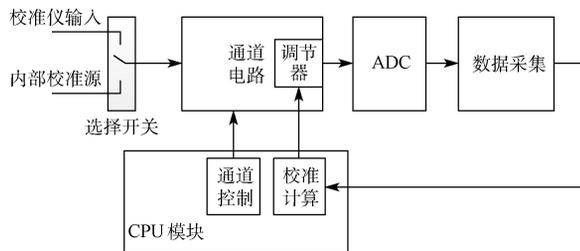


图 2 内置校准系统校准过程示意图

的放大倍数,完成直流增益准确度的校准。

3 具体实现

3.1 直流增益调节方法设计

为了提高数字示波器直流增益准确度的校准精度,本系统的直流增益调节器采用了高速、高性能、可编程的差分放大器 LMH6881,该芯片具有 2.4 GHz 的带宽,完美结合了全差分放大器和可变增益放大器的优点,支持在 6~26 dB 范围内进行增益设置,增益步长为 0.25 dB,可以实现通道增益的精细微调。

LMH6881 的电路设计如图 3 所示,通道差分信号 IN_P、IN_N 接入 LMH6881 的信号输入端,LMH6881 的信号输出端连接到 ADC 的输入端 ADC_P、ADC_N,ADC 的共模电压接入 LMH6881 的 OCM 端。

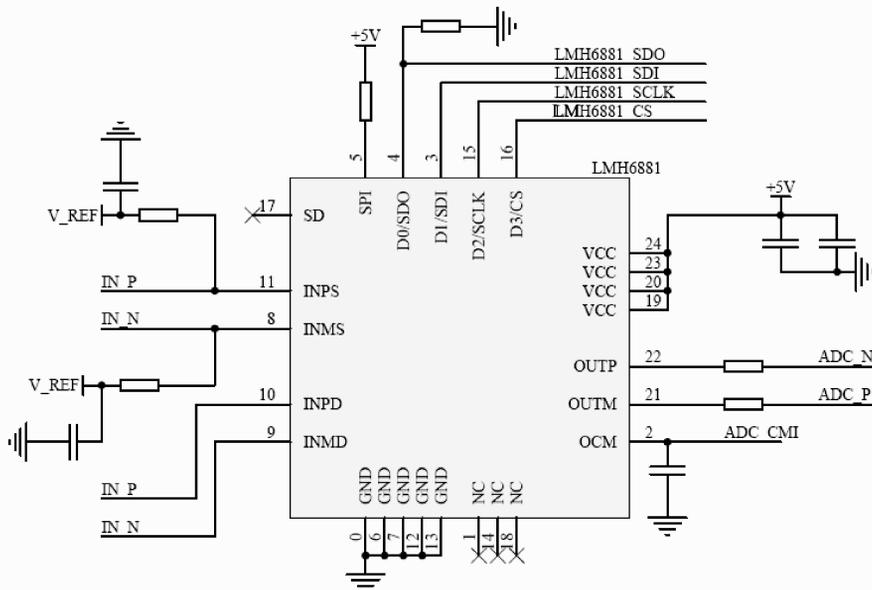


图 3 放大器设计电路图

通过 SPI 方式实现对 LMH6881 的增益控制寄存器的设置,寄存器地址为 3,寄存器定义如表 1 所示。

表 1 LMH6881 增益控制寄存器定义

位	7	6	5	4	3	2	1	0
定义	保留	16	8	4	2	1	0.5	0.25

LMH6881 的寄存器设置值计算公式为:

$$Register = \text{int}((26 - Gain) * 4 + 0.5) \quad (1)$$

式中,Register 为增益控制寄存器设置值,Gain 为根据采样数据与标准电压计算出来的校准参数,即调节器的增益,int()代表浮点数取整。

对应的增益调节器的放大倍数计算公式为:

$$K = 10^{\frac{m}{20}} \quad (2)$$

式中: K 为对应直流增益的调节放大倍数。

3.2 校准仪接口设计

本系统可选用多个型号的校准仪完成直流增益准确度的校准,如 FLUKE 公司的 9500B、5520、5522 等,内置的校准源也可提供 $\pm 4.096\text{ V}$ 范围内的可调高精度标准电压。不同型号的校准仪,程控命令不完全一致,为了扩展的方便,本系统用统一的接口对各种型号的校准仪驱动进行了封装^[12-13],逻辑架构示意图如图 4 所示。用户层的校准程序调用接口函数控制校准仪输出,适配层根据用户选择的校准仪,调用不同的 DLL 驱动程序。在 DLL 程序中发送相应的程控指令,通过相应的程控总线控制校准仪输出指定的电压信号。如果选用的是内部校准源,则通过 SPI 总线控制 DAC 完成指定电压信号的输出。

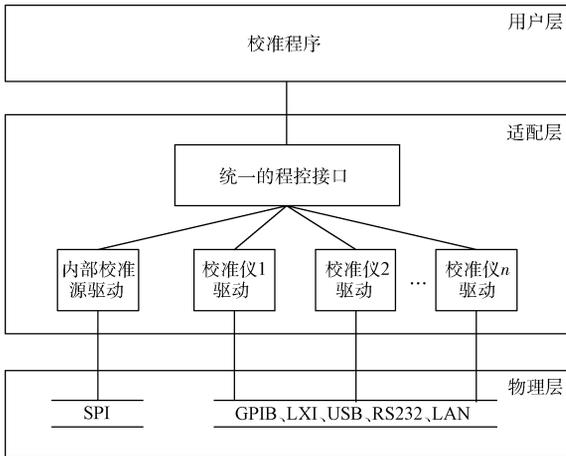


图 4 逻辑架构示意图

3.3 内部校准源设计

本内置校准系统的内部校准源采用 14 位轨对轨高精度数模转换芯片 LTC2610 提供标准电压输出,该芯片各个通道之间的串扰小于 $10\ \mu\text{V}$,满足万分之一的精度要求。内部校准源电路设计如图 5 所示,基准电压芯片给 LTC2610 提供 4.096 V 的外部基准电压,通过 SPI 方式控制 LTC2610 产生 $0\sim 4.096\text{ V}$ 的输出电压,经由放大器 AD8513 组成的电压调节驱动电路后,最终产生 $\pm 4.096\text{ V}$ 范围内的直流电压信号供校准使用。

3.4 校准程序设计

校准程序的流程如图 6 所示,校准时,首先要保证通道的零点偏移正确,在关闭校准仪输出的情况下,确保示波器的基线位于屏幕中心。

校准程序直接根据采集数据计算直流增益调节器的设置值,首先计算当前示波器的直流增益,公式如下:

$$G = \frac{U}{U_0} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)/N}{U_0} \quad (3)$$

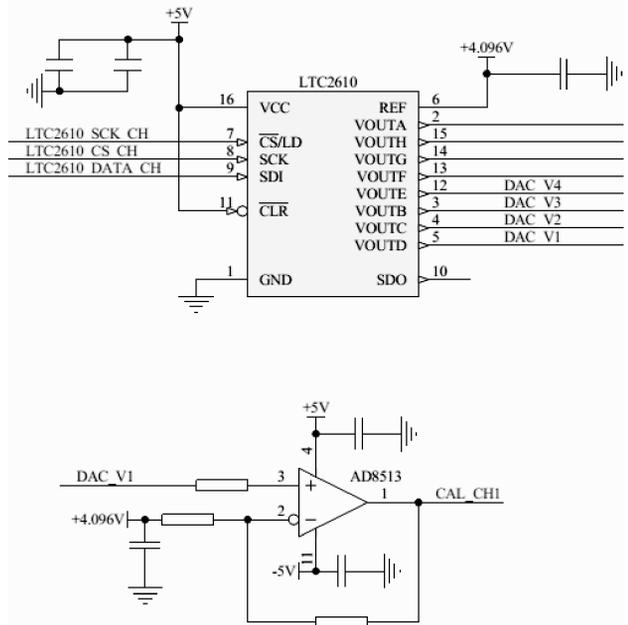


图 5 内部校准源电路

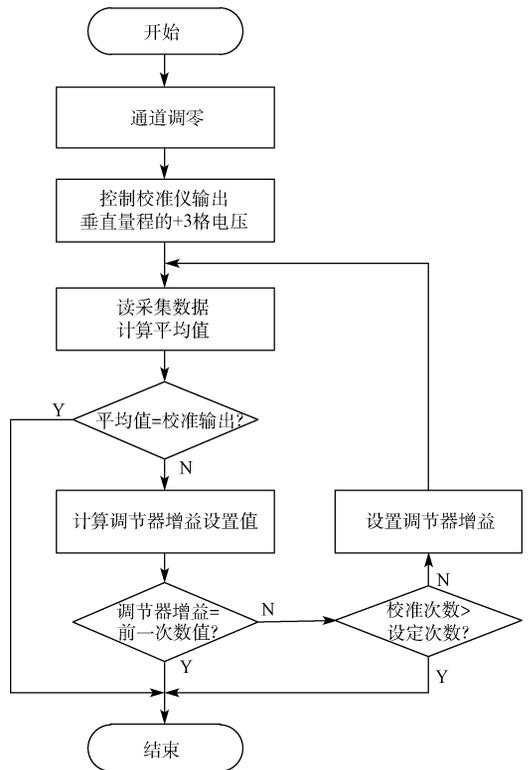


图 6 校准流程图

式中: G 为示波器的直流增益, U 为示波器的电压测量结果,对于直流电压,可由采集数据的平均值计算得到, $x(i)$ 为采集数据对应的电压, N 为采集数据的个数, U_0 为标准电压。

调节器将当前的放大倍数乘以 $1/G$ 来修正增益误差, 根据式(2), 得到调节器的增益 $Gain$ 的计算公式如下:

$$Gain = Gain_{old} - 20 * \log_{10} G \quad (4)$$

式中: $Gain_{old}$ 为上一次的增益值。

4 具体应用

本文方法已成功应用于某型数字存储示波器中, 该示波器运行在 Intel 公司的 Bay Trail 平台上, CPU 为 ATOM E3827, 主频 1.75 GHz, 采用 Windows 7 操作系统; 最高采样率为 5 GSa/s, 带宽为 500 M, 具有 4 个模拟输入通道, 通道具有 AC、DC 耦合方式, 输入阻抗包括 50Ω 、 $1 M\Omega$, 垂直量程范围在 50Ω 时为 $1 mV \sim 1 V$, $1 M\Omega$ 时为 $1 mV \sim 10 V$, 直流增益准确度的指标为 $\pm 1.5\%$ 。为验证本系统的性能, 在该型数字示波器的内置校准功能中分别选用 FLUKE 9500B 校准仪和内部校准源完成了直流增益准确度的校准。

完成校准后, 以 $100 mV$ 量程, 50Ω 输入阻抗的测试条件为例, 对校准效果进行了验证。通过校准仪分别输出 $50 mV$ 、 $150 mV$ 、 $250 mV$ 、 $350 mV$ 的直流信号, 进行平均值参数测量。

根据直流增益误差的计算公式^[14]:

$$\Delta G_r = \frac{1-G}{G} \quad (5)$$

式中: ΔG_r 为直流增益误差, G 为放大倍数, 分别计算各次测试的直流增益误差, 均满足 $\pm 1.5\%$ 的要求。测量和计算结果如表 2 所示。

表 2 测量和计算结果

测量电压/mV	9500B 校准/mV	ΔG_r (%)	内部校准源校准/mV	ΔG_r (%)
50	49.56	0.89	49.58	0.85
150	149.57	0.29	151.45	-0.96
250	250.93	-0.37	251.26	-0.50
350	351.49	-0.42	353.21	-0.91

为了进一步验证校准效果, 在 50Ω 输入阻抗时, 对各垂直量程分别进行了验证, 校准仪输出 $+2$ 格的直流信号, 经内部校准源校准后测量结果如表 3 所示, 均满足要求。

表 3 各垂直量程的测量和计算结果

量程/mV	测量结果/mV	ΔG_r (%)	量程	测量结果/mV	ΔG_r (%)
1	2.02	-0.99	50mV	100.56	-0.56
2	4.03	-0.74	100mV	201.33	-0.66
5	10.05	-0.50	200mV	402.94	-0.73
10	20.12	-0.60	500mV	1.009V	-0.89
20	40.25	-0.62	1V	2.016V	-0.79

为了验证本系统的效率, 在校准的过程中分别记录校准完成时间, 与采用程控计算机的系统完成同样校准任务的时间进行对比, 如表 4 所示。

表 4 校准时间对比

校准系统	单通道校准	全部通道
	时间	校准时间
计算机校准系统	94.1	379.6
本校准系统(校准仪)	42.9	173.3
本校准系统(内部校准源)	36.0	145.5

由表中数据可以看出, 使用本内置校准系统进行直流增益准确度的校准, 在满足指标要求的同时, 大大缩短了校准时间, 提高了校准效率。

5 结 论

直流增益准确度内置校准系统的设计, 降低了校准系统的复杂性, 节省场地, 易于使用, 同时有效提高了校准效率, 实际应用效果良好。该内置校准系统可灵活扩充数字示波器其它指标的校准, 对其它测量仪器的校准也具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 刘明亮, 朱江森. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1041-1046.
- [2] 江思杰, 马耿, 江传华. 基于 GJB7691-2012 的通用数字示波器自动检定关键技术的研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(3): 55-58.
- [3] 曾荣, 于杰, 白巍, 等. 9500 示波器校准仪自动检定系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(10): 45-47.
- [4] 姚洪奎. 数字示波器自动化测试软件系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 70.
- [5] 杨素娥, 吴春婵, 聂继鑫. 数字存储示波器检定方法探讨[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(4): 54-59.
- [6] GJB7691-2012 数字示波器检定规程[S]. 2012.
- [7] 胡龙飙, 尹洪涛, 付平. LXI 数字多用表设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(8): 46-50.
- [8] 叶川, 陈强, 刘晓勇. 基于多种仪器总线多通道示波器校准系统[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(7): 77-80.
- [9] 王强, 郭海帆, 高雪. 基于 CVI 的数字示波器自动校准系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(5): 731-735.
- [10] 李宪优, 王玲, 阮林波, 等. 数字示波器自动检定方法与实现[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(2): 79-82.

(下转第 41 页)