

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417095

基于 STM32 和 USB 的多功能数据采集系统设计^{*}

陈威威¹ 徐会员¹ 王峰²

(1. 重庆邮电大学光电工程学院 重庆 400065; 2. 上海简仪科技有限公司 上海 201203)

摘要: 为了更好地满足工业生产和自动化控制领域的多样化需求,针对现有通用数据采集系统中存在的便携性差、功能有限的缺点,设计实现一种基于 STM32F723ZET6 微控制器的多功能通用 USB 数据采集系统。通过 USB 接口,系统可以通过上位机软件控制实现 16 通道模数转换数据采集、双通道数模转换模拟输出以及 PWM 检测和生成,并实时地把采集或输出的数据显示到上位机上。通过实际测量,该系统可以实现最高 1 MS/s 的模拟输入采样率和模拟输出更新率,能够检测和生成频率最高为 1 MHz、占空比最低达 1% 的 PWM 信号,且信号采样精度高,传输数据可靠。该系统具有高便携性、高性价比、功能丰富,符合实际应用需求。

关键词: STM32; USB; 数据采集; 多功能; 低成本

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Multifunctional data acquisition system based on STM32 and USB bus

Chen Weiwei¹ Xu Huiyuan¹ Wang Feng²(1. School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. Shanghai Jianyi Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: To better meet the diverse needs of industrial production and automation control, and to address the limitations of poor portability and limited functionality in existing general-purpose data acquisition systems, this paper presents the design and implementation of a multifunctional USB data acquisition system based on the STM32F723ZET6 microcontroller. Through the USB interface, the system can be controlled via host computer software to perform 16-channel analog-to-digital conversion data acquisition, dual-channel digital-to-analog conversion output and PWM signal detection and generation. Meanwhile, the acquired or output data is displayed in real-time on the host computer. Practical measurements indicate that the system can achieve a maximum analog input sampling rate and analog output update rate of 1 MS/s. Additionally, the system can detect and generate signal with a frequency up to 1 MHz and a minimum duty cycle of 1%, which ensuring high precision signal sampling and reliable data transmission. This system offers high portability, cost-effectiveness, comprehensive functionality, and meets the requirements of practical applications.

Keywords: STM32; USB; data acquisition; multifunctional; low cost

0 引言

随着现代科学技术特别是嵌入式技术的快速发展,诸如工业生产、自动化控制等领域对数据采集系统在便携性、功能性和成本等方面提出了更高的要求。当前国内外数据采集技术主要有如下两种方式:1)现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)芯片或者其他可编程器件+配置电路方式;2)微控制器芯片+模数转换芯片电路方式^[1]。其中,方式 1)通常结合高速总线接口,例如

PCI/PCIe 总线接口,来实现高的采样速率和传输速率^[2-4],适用于高速、高精度的数据采集应用场景。但这种方式存在功耗高、便携性差以及价格昂贵等缺点,不适合那些变化缓慢或者不需要高频数据更新的应用场景,比如环境监测,农业监控等领域。方式 2)与方式 1)相比,通过使用微控制器芯片代替 FPGA 芯片可以实现更低成本的数据采集系统^[5-7]。虽然其采样速率相对较低,但整体功耗低,易于开发,更适用于通用低速的数据采集应用场景。并且由于通用串行总线(universal serial bus, USB)接口具有其体积小、

收稿日期:2024-10-13

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(62104023)、重庆邮电大学博士启动资金(E012A2020018)项目资助

传输速率高、低成本、即插即用、高可靠性以及广泛的支持等优点^[8-10],常与方式 2 结合使用。例如,屠晓伟等^[11]提出的由 STM32 和 EZ-USB 组成的系统可以将 STM32 原有的 USB 传输速度提升两倍以上,并且采集的数据能在虚拟仪器上位机上实时显示;辛凯等^[12]提出一种基于 STM32 的海洋环境数据采集系统设计,可通过 USB 数据线连接到上位机,方便实验数据的读取,即插即用。但现有的基于 STM32 和 USB 的数据采集系统存在通道数较少、便携性较差、功能有限等缺点,系统缺乏对模拟信号输出和 PWM 信号检测和输出能力的集成,通用性较差。

基于上述考虑,本文设计一个基于 STM32 和 USB 的多功能数据采集系统,完整的系统包含硬件和软件组件,具有 16 通道数据采集、2 通道模拟信号输出、PWM 信号采集与输出以及通用 IO 接口等功能。系统提供了适用于测试和测量应用的多种功能。其中,系统选择以 STM32F723ZET6 微控制器芯片作为主控制器。STM32F723ZET6 微控制器具有 216 MHz 的工作频率,其相对低成本效益和丰富的功能特性成为本数据采集系统的优先选择,并且芯片内部包含一个 USB 接口,用于与主机进行数据传输,传输速率可达 12 Mbps;包含 2 个 32 位计

数器,用于 PWM 检测和输出。在数据采集和输出方面,系统使用具有集成模拟前端(analog front end, AFE)的 16 通道、16 位、1 MS/s、双路同步采样的 ADS8686S 芯片来采集模拟信号;使用具有 16 位、双通道的 DAC8812 芯片来输出模拟信号。本文给出了系统的硬件架构以及软件运行流程,对系统进行了功能和性能测试,验证了系统运行的可靠性和稳定性,证明系统在通用低速数据采集领域具有广阔的应用前景。

1 系统概述

系统的整体架构图如图 1 所示。整个系统由硬件和软件两部分组成。硬件电路可以分为:电源电路、控制电路、功能电路 3 部分。电源电路通过使用多片开关电源芯片和稳压芯片来提供的干净电源;控制电路以 STM32F723ZET6 微控制器为核心,负责控制模数转换芯片、数模转换芯片的正常运行以及 PWM 信号的检测和输出。此外,系统还使用 STM32F723ZET6 微控制器的 1 个 USB 接口用于与上位机通信、8 个通用输入/输出接口和 1 个内部集成电路总线接口用于扩展应用;功能电路包括模拟信号采集电路和模拟信号输出电路,分别用于采集和输出模拟信号。

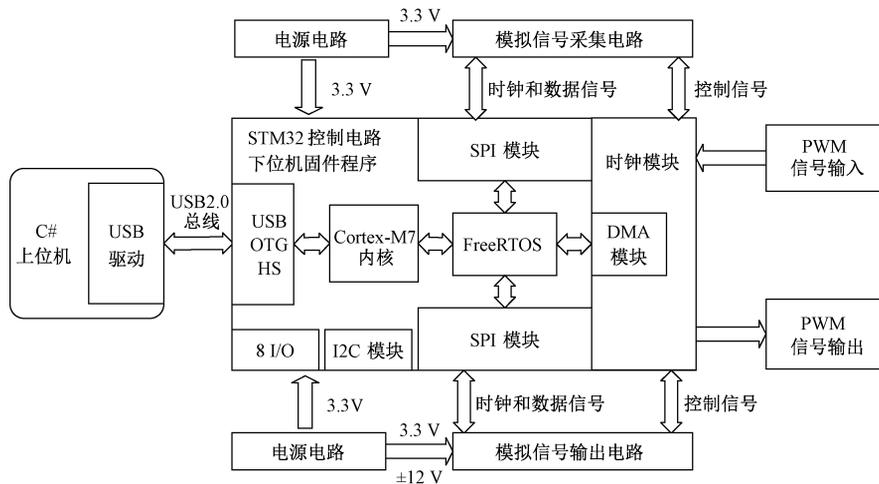


图 1 系统框图

Fig.1 System block diagram

软件主要分为上位机程序和下位机程序。上位机程序代码运行在主机上,采用 C# 语言编写,具备图形用户界面。它通过配合 USB 驱动程序与下位机软件通信,从而实现系统参数配置及运行监控功能。其中,USB 驱动程序充当上位机软件和下位机程序之间通信的桥梁,上位机程序可以通过驱动程序访问硬件设备,以实现应用层与设备的交互^[13-14]。下位机程序运行在 STM32 微控制器上,通过 USB 接口从上位机中接收数据以及任务配置信息,并利用实时操作系统(free real time operating system, FreeRTOS)配合直接存储器访问、串行外围设备接口(serial peripheral interface, SPI)、定时器成片上外设以及

外部功能电路来执行 PWM 信号的检测和生成、模拟信号采集以及模拟信号输出任务。

2 硬件系统设计

系统通过 USB 接口提供 5 V 电源给电源电路,后者为 STM32F723ZET6、ADS8686S、DAC8812 芯片及其外围电路供电。STM32 最小系统作为中央控制单元,通过 USB 接口与主机通信,控制数据采集和输出,并利用内置定时器模块实现 PWM 信号的检测和生成。模拟信号采集和输出电路负责 16 通道模拟信号采集和 2 通道模拟输出。

2.1 电源电路

电源电路目的是给整板提供电源:5、13、-13、12、-12 V, 电源框图如图 2 所示。

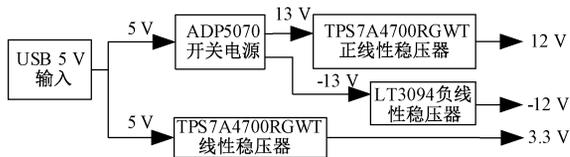


图 2 电源电路框图

Fig. 2 Power supply circuit block diagram

其中,5 V 是用于转换为其他所需电压的源电压。5 V 源电压经过开关电源和线性稳压器最终对外输出 3.3 V 和 ±12 V。其中 3.3 V 主要用于 STM32 控制电路、模数转换以及数模转换电路。数模转换电路除了需要 3.3 V 电源外给转换芯片外,还需要 ±12 V 电源供给芯片外围的运放电路。此外,在电源电路中之所以通过开关电源生成 ±13 V 电源后再通过稳压器转换为 ±12 V 是为了消耗电源中的高频噪声,提高电源抑制比,产生更加纯净的电源。

2.2 D/A 转换电路

为了使系统的模拟输出能够应用于更多场景,系统所选择数模转换芯片需要具有多通道、高输出精度和低误差等特性。考虑到这些参数,本系统选择了具有双通道、16 位的 DAC8812 芯片。其低噪声特性,确保输出的高精

度和可靠性。D/A 输出电路框图如图 3 所示。STM32 单片机通过 SPI 总线将控制和待转换的数据传输到数字模拟转换器(digital to analog converter, DAC)芯片, DAC 芯片根据接收到的数据产生对应的电流信号 I_1 和 I_2 到外围运算电路。外围运算电路首先会使用跨阻配置的运算放大器将电流转换为电压,随后用另一个求和配置的放大器施加偏置电压。最终,电流经过外围的运放电路后会被转换为对应 V_1 、 V_2 电压信号对外输出。

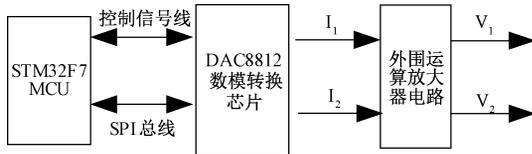


图 3 D/A 输出电路框图

Fig. 3 D/A output circuit block diagram

图 4 为 DAC8812 具体的硬件原理图,其中图 4 左侧的 SDI、CS 和 CLK 引脚是 SPI 总线引脚,用于接收从 STM32 芯片中传输过来待转换数据。LDAC 引脚用于更新 DAC 输出。右侧为两路输出引脚,其中 VREF 是 DAC 的参考电压输入引脚。RFB 是用于连接外围运算放大器电路输出的引脚。IOUT 是芯片对外输出的电流引脚。最终的模拟输出电压就是在 IOUT、VREF 和 RFB 引脚以及外围运算放大电路的相互配合下对外输出。

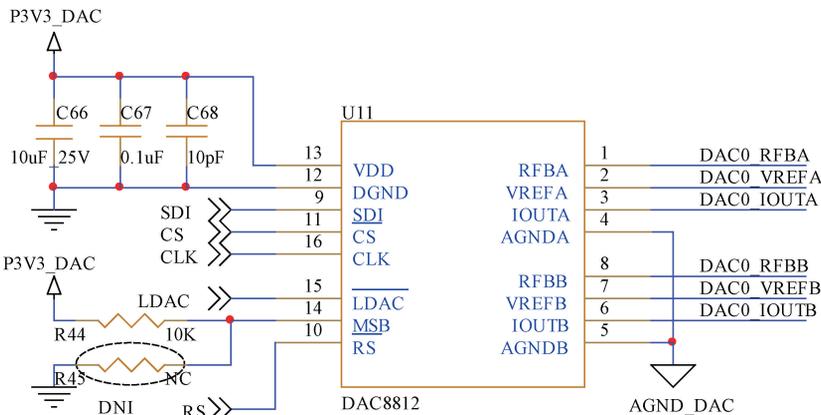


图 4 DAC8812 原理图

Fig. 4 DAC8812 schematic diagram

2.3 A/D 转换电路

系统选择 ADS8686S 芯片作为模拟信号采集芯片。该芯片能够接受 ±2.5、±5、±10 V 的双极输入范围,最高支持 1 MS/s 采样率,有高度可配置的通道序列发生器,可减少后端控制器或处理器上的定序开销。这使得它能够满足系统对宽输入范围、多通道、高精度数据采集的要求。A/D 采集电路框图如图 5 所示。

其中,A0~A7、B0~B7 为共计 16 个采集通道,且对应的 A、B 通道可进行同步信号采集,在进行数据采集时,采

集电路会通过外部 RC 低通滤波器电路对待采集的输入信号进行第 1 次滤波。滤波后的信号进入芯片后会进行 2 次滤波来进一步滤除高频噪声。通过滤除高频噪声可以提高信号的信噪比,减弱噪声对输入信号的干扰。输入信号经过模拟数字转换器(analog-to-digital converter, ADC)芯片处理得到数据会通过 3 线 SPI 总线传输到 STM32 后进行缓存和进一步处理,之后再通过 USB 接口传输到上位机中显示。

图 6 为 ADS8686S 硬件原理图,图 6 中显示 ADC 芯片

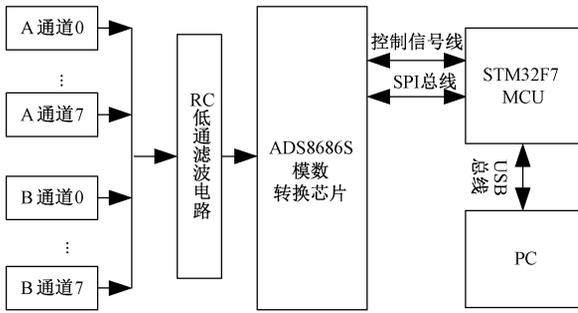


图5 A/D采集电路框图

Fig. 5 A/D acquisition circuit block diagram

主要的连接部分。其中 AIN₀~AIN₇、BIN₀~BIN₇ 为 16 个外部信号输入端。SER/BYTE/PAR 引脚接高电平, DB9/BYTESEL 引脚接低电平, 表示芯片工作在软件串行模式下。CONVST 引脚使能表示对选定的输入通道启动新的转换。BUSY 信号则是忙信号, 表示芯片是否正在转换。最后转换数据会通过 SPI 总线输出到 STM32 中处理后传输到上位机中存储和显示。

3 软件程序设计

USB 多功能数据采集系统的软件设计包括下位机软件和上位机软件两部分。下位机软件实现具体的任务, 包

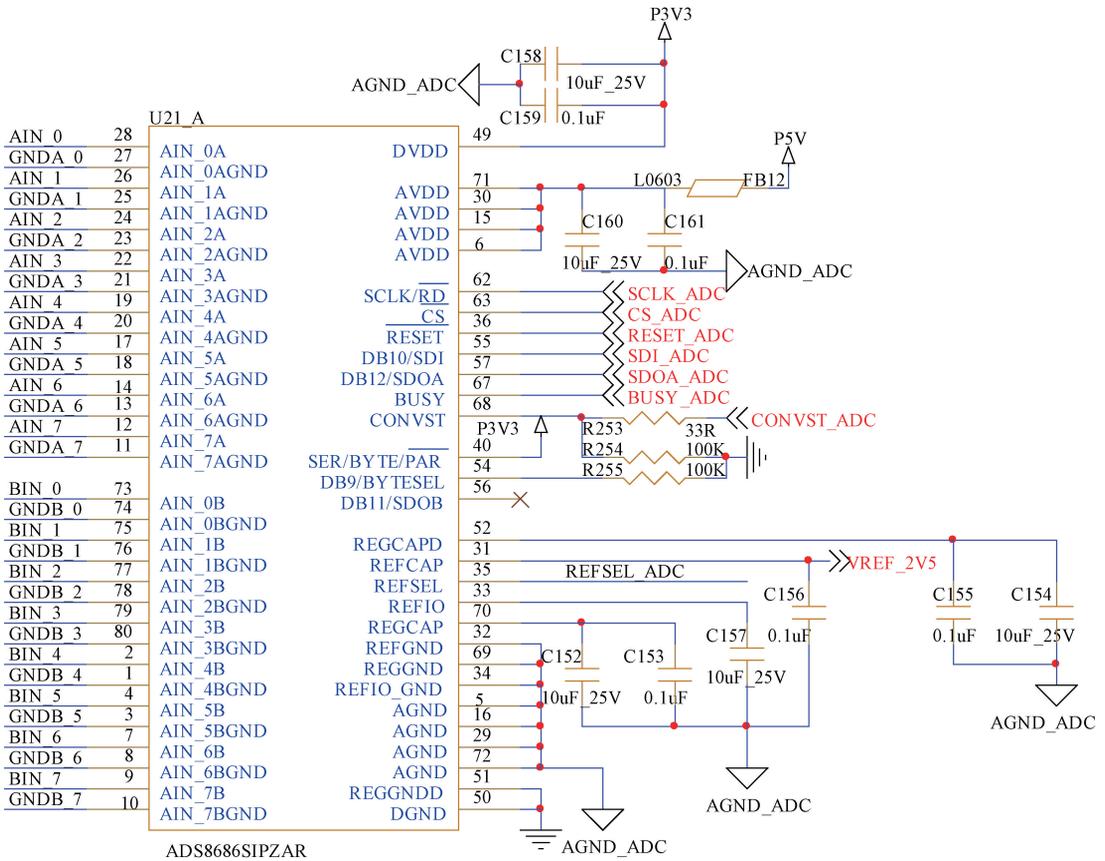


图6 ADS8686S原理图

Fig. 6 ADS8686S schematic diagram

括 USB 通信、多通道数据采集、双通道模拟输出以及 PWM 信号检测和输出控制任务。上位机软件则是编码实现的图形用户界面, 使用户能够方便的选择要执行的任务, 并配置任务信息, 比如选择模拟采集任务, 并配置输入范围、采样频率、采样通道采样时间等参数。

3.1 USB 固件程序设计

STM32F723ZET6 内包含 USB OTG 外设, 支持主机端和设备端的 USB 通信功能^[15-16]。系统通过使用意法半导体公司专门为 STM32 系列芯片提供的 USB 固件库来开发 USB 固件程序。USB 固件库支持使用户通过修改

USB 描述符、端点并配合调用相关函数来实现 USB 接口通信, 即对应修改用户接口层中的 usb_desc.c 和 usb_endp.c 文件^[17]。

3.2 FreeRTOS 程序设计

考虑到系统对多任务的要求, 包括 ADC 数据采集任务、DAC 模拟输出任务以及 PWM 信号检测和输出等任务, 操作系统(如实时操作系统)的集成对于高效的多任务管理至关重要。

ST 公司针对 STM32 提供了对 FreeRTOS 的全面支持, 包括各种驱动程序包和社区资源, 这有效地帮助开发

人员进行软件开发^[18]。下位机软件程序框图如图 7 所示。

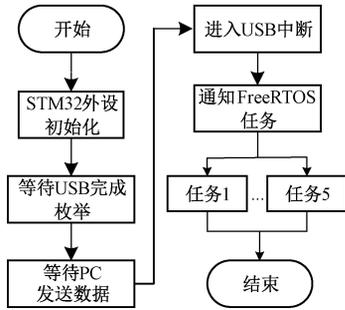


图 7 下位机程序框图

Fig. 7 Microcontroller program block diagram

在 USB 初始化并完成枚举后,下位机将等待接收上位机发送的任务指令及配置信息,并将其存储到 FIFO 中,随后进入 USB 中断处理状态,并在中断中通知 FreeRTOS 操作系统执行上位机设置的任务。每个任务都被赋予了相同的优先级“osPriorityNormal”。尽管这些任务的优先级相同,FreeRTOS 仍然可以通过时间分片机制在它们之间切换。并且多个任务可以并发执行,如同时执行 A/D 和 D/A 转换,任务之间并不会互相干扰。即使其中一个任务运行意外中止也不会影响其他任务的运行,从而有效地提高了程序的稳定性。

3.3 A/D 转换程序设计

图 8 显示了 A/D 转换程序框图。采集任务启动后,系统首先会通过 USB 接口接收用户在上位机上配置的任务参数,并将这些参数缓存在下位机设置的寄存器中。这些参数包括输入电压范围、采样率、采样通道和过采样设置。接着系统会检查当前的任务状态。如果一项采集任务已经在进行中,则立即终止;否则,初始化一个新的数据采集任务。

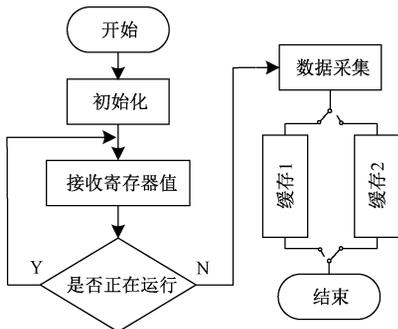


图 8 A/D 转换程序框图

Fig. 8 A/D conversion program block diagram

为了确保可以实时或接近实时地处理和传输数据,本系统采用了双缓冲数据流模式。在这种操作模式下,程序建立了两个大小相等的缓冲区,一个用于数据输入缓存,保存 ADC 芯片采集到的数据;另一个用于数据处理,处理后的数据通过 USB 接口传输到上位机。一旦当前活动缓

冲区满容量或者数据处理结束,系统就会无缝触发缓冲区交换操作。这种循环过程持续进行,以保证数据的传输连续不间断。双缓冲数据流模式的实现,保证了数据流的连续性,大大提高了系统传输数据的性能。

3.4 D/A 转换程序设计

模拟信号输出的过程与模拟信号采集的过程类似。同样的,它根据 USB 接口从上位机接收寄存器值来决定 DAC 芯片输出模拟信号的幅值、频率、通道数以及是同步还是异步输出。此外,DAC 模拟输出也采用双缓冲模式工作,与 ADC 数据采集的区别只是数据方向不同,DAC 模拟输出是从上位机接收数据并通过 DAC 芯片输出模拟信号。

3.5 PWM 信号检测及输出程序设计

PWM 信号的检测和生成使用的是 STM32 微控制器内置的两个 32 位定时器来实现的。这两个定时器可以充当计数器,每个定时器有两个输入通道和一个输出通道。当 PWM 信号检测或生成任务开始时,每个定时器可以根据 USB 接收的配置参数来决定是进行 PWM 信号检测还是信号生成。PWM 信号检测与输出框图如图 9 所示。

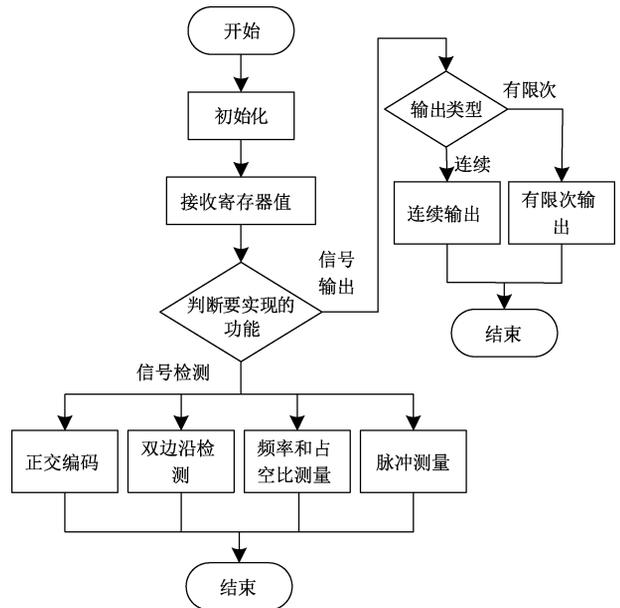


图 9 PWM 信号检测与输出程序框图

Fig. 9 PWM signal detection and output program block diagram

系统在完成初始化以及寄存器接收之后将会判断将要执行的任务,如果任务是 PWM 信号检测,则测试输入的 PWM 信号。该测试包括脉冲测量、双边沿间距测量、周期和频率测量以及输入信号的正交编码。如果任务是 PWM 信号生成时,系统根据存储在寄存器中的值来决定生成连续还是有限的具有特定占空比和频率的 PWM 信号。

3.6 上位机软件设计

上位机软件是使用 Visual Studio 作为开发环境,采用 C# 语言编程实现的窗体应用程序。它不仅拥有直观且用

户友好的界面设计,而且能够充分利用.NET框架下丰富的官方控件及第3方控件资源,使得开发者可以快速高效地编写出满足特定需求的应用程序。

系统窗体程序界面如图10所示,图中左侧显示的波形是信号采集得到的波形图,右侧为任务参数设置选项,可以设置采样通道、采样率、采样点数以及输入范围等参数。程序界面共有4个部分构成,分别是模拟信号采集界面、模拟信号输出界面、PWM信号的检测与输出界面以及DIO数字输入输出界面。使用者可以通过选项卡控件选择不同功能界面实现相应功能,且每个界面相对于其他界面是独立的。应用程序允许用户可视化操作,用户可以在程序界面选择和执行相应任务、配置任务参数,模拟采集和模拟输出的结果将显示窗体界面中。

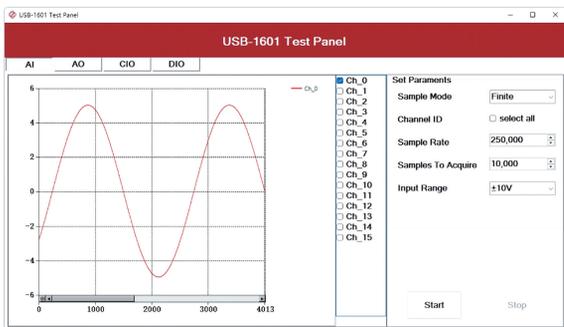


图10 上位机软件 AI 采集界面

Fig. 10 Upper computer software AI acquisition interface

4 系统性能验证及分析

4.1 实验方案

本章对系统整体性能进行测试。具体为信号采集性能验证、信号输出性能测试、系统输入输出回环测试以及PWM信号检测与输出测试,试验流程如图11所示。

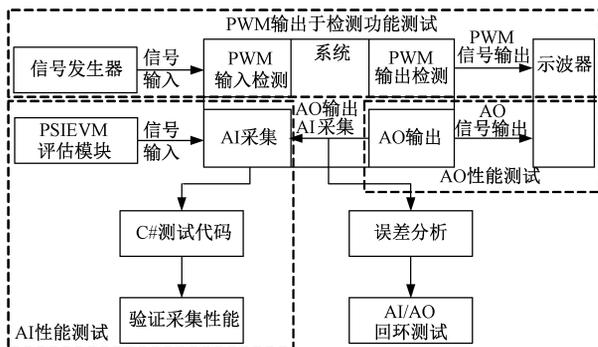


图11 测试流程

Fig. 11 Test procedure

对于信号采集性能测试,使用TI公司PSIEVM评估模块输出的正弦信号作为信号源,该评估模块主要功能是输出用于测试ADC性能的精密正弦信号。使用系统在1 MHz采样率下采集该正弦信号系统并通过测试程序计

算和具体性能参数;

对于信号输出性能测试,使用系统的输出频率为2 kHz,电压峰峰值为10 V的正选信号,然后使用示波器测量得到AO输出性能参数;

对于系统回环测试,使用系统输出-10~+10 V范围内的直流信号,然后同样使用系统进行采集,测试系统信号采集和输出的绝对误差以及相对误差;

最后对于PWM信号检测与输出测试,使用外部信号发生器生成1 MHz、50%占空比的信号来测试系统PWM信号检测功能;使用系统输出1 MHz、占空比为50%的PWM信号来测试PWM信号输出功能。

系统测试环境如图12所示。图12中自左向右,自上而下分别为信号发生器和可编程直流电源、示波器、系统硬件板卡、PSIEVM评估模块、电脑等器件。

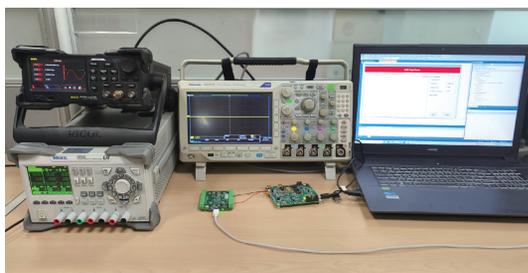


图12 系统测试环境

Fig. 12 System test environment

4.2 信号采集性能测试

实验使用的正弦信号由PSIEVM评估模块输出。设置输出电压峰峰值为10 V、频率为2 kHz的连续高精度正弦信号。在1 M采样率、10挡位下采集PSIEVM评估模块输出的正弦信号,采集的信号波形如图13所示。

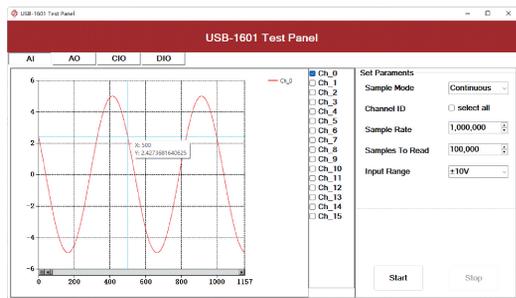


图13 AI采集波形图

Fig. 13 AI acquisition waveform

图13中,横坐标是采集的点数,纵坐标是采集信号的幅值,从图中可以看出采集一个周期采集500个点,采集的信号频率为2 kHz,可以计算出采样率为1 MS/s,达到设计的1 MS/s采样率。并且采集的信号波形平滑,无失真。

使用测试程序测试采集的系统噪声(system noise)、信噪比(SNR)、信号与噪声失真比(SINAD)、总谐波失真

(THD)、无杂散动态范围 (SFDR) 以及通道串扰 (Crosstalk) 等参数。

测试结果如表 1 所示。从测试结果可以看出,尽管随着输入挡位的提高,系统噪声和总谐波失真性能下降幅度较大,系统噪声从 $71 \mu\text{V}$ 增加到了 $410 \mu\text{V}$;总谐波失真从 -101 dB 下降到了 -82 dB ,但其他参数指标变动较小,整体性能依然保持了良好的稳定性。这表明系统在较宽的电压范围内具备良好的抗干扰能力,可以进行稳定、高精度的模拟信号采集。

表 1 AI 采集性能测试结果

Table 1 AI acquisition performance test results

测试项	2.5 V 挡位	5 V 挡位	10 V 挡位
System Noise/ μV	71	220	410
THD/dB	-101	-89	-85
SFDR/dB	91	89	85
SNR/dB	76	80	82
SINAD/dB	76	79	79
Crosstalk/dB	-76	-80	-84

4.3 信号输出性能测试

使用系统的输出频率为 2 kHz ,电压峰峰值为 10 V 的正选信号,使用示波器进行测量得到输出性能参数。

系统上位机显示输出波形如图 14 所示,图 14 中横坐标是输出的点数,纵坐标是输出模拟信号的幅值。从图中可以看出,输出的 2 kHz 信号一个信号周期为 500 个点,也就是说系统每秒可以输出 1 M 个点,其模拟输出更新率可以达到 1 MS/s ,达到设计要求的 1 MS/s 输出更新率。

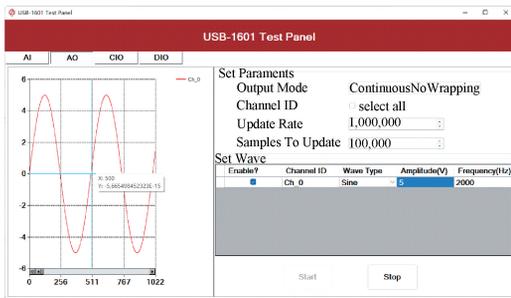


图 14 AO 输出波形图

Fig. 14 AO output waveform

经过示波器测量系统输出的波形如图 15 所示,从图中可以看出,信号频率为 2.001 kHz ,电压峰峰值为 10 V ,且信号波形完整。

4.4 系统输入输出回环测试

设计使用本系统进行回环测试来检测模拟信号输出和采集的准确性,即使用系统 AI 来采集系统 AO 输出的模拟信号。系统 AI 采集和 AO 输出范围都为 $-10 \sim 10 \text{ V}$,因此设置系统 AO 分别输出幅值 -10 、 -7.5 、 -5 、 -2.5 、 0 、

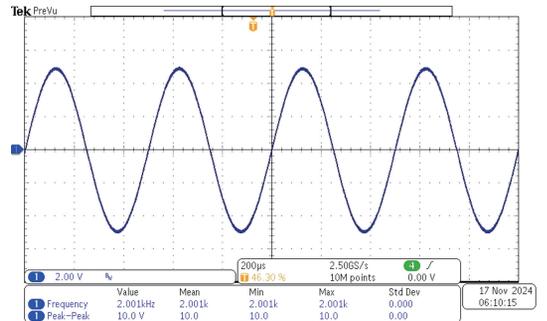


图 15 示波器显示

Fig. 15 Oscilloscope display

2.5 、 5 、 7.5 、 10 V 的直流信号,然后使用示波器测量得到 AO 输出信号的平均值,求出绝对误差和相对误差。

使用系统的 AI 采集部分在 1 MS/s 采样率下对每个信号进行连续采集,采集 10 万个点,根据采集的数据来求其平均值、绝对误差、相对误差。表 2 显示了 AO 输出结果,表 3 显示了 AI 采集结果。从表 2 AO 输出和表 3 AI 采集的结果可以看出,系统 AO 输出的绝对误差范围在 $0.000 104 \sim 0.000 660 \text{ V}$ 之间,而相对误差则在 $0.001 39\% \sim 0.008 54\%$ 之间;AI 采集的绝对误差范围在 $0.000 084 \sim 0.000 498 \text{ V}$ 之间,而相对误差则在 $0.003 04\% \sim 0.004 98\%$ 之间,两者的绝对误差和相对误差都维持在一个很小范围内,体现了系统的准确性。并且系统在多个测试点上的表现都显示出良好的稳定性和一致性,适用于精密测量和控制。

表 2 AO 输出测试

Table 2 AO output test results

设置值/V	平均值/V	绝对误差/V	相对误差/%
-10.0	-10.000 66	0.000 660	0.006 60
-7.5	-7.499 592	0.000 408	0.005 44
-5.0	-5.000 206	0.000 206	0.004 12
-2.5	-2.499 805	0.000 195	0.007 80
0	0.000 234	0.000 234	不适用
2.5	2.500 133	0.000 133	0.005 32
5.0	4.999 573	0.000 427	0.008 54
7.5	7.499 896	0.000 104	0.001 39
10.0	9.999 349	0.000 651	0.006 51

4.5 PWM 信号检测与输出测试

上位机检测界面如图 16 所示,右半部分即 CO 部分为 PWM 生成配置选项,可以选择生成信号的频率、占空比、个数等;左半部分即 CI 部分为 PWM 检测配置选项,可以在 Measure Type 中选择测试项,测试选型如图 17 所示。从上到下分别为边沿检测、周期测量、频率测量、脉冲测量、双边沿检测和正交编码。

在 PWM 信号检测与输出实验中,使用系统产生一个

表3 AI采集测试

Table 3 AI acquisition test results

输入/V	平均值/V	绝对误差/V	相对误差/%
-10.000 66	-10.000 162	0.000 498	0.004 98
-7.499 592	-7.499 978	0.000 386	0.005 15
-5.000 206	-5.000 042	0.000 224	0.004 48
-2.499 805	-2.499 872	0.000 067	0.002 68
0.000 234	0.000 150	0.000 084	不适用
2.500 133	2.500 209	0.000 076	0.003 04
4.999 573	4.999 339	0.000 234	0.004 68
7.499 896	7.500 270	0.000 374	0.004 99
9.999 349	9.999 819	0.000 470	0.004 70

结果如表5所示。测试结果显示测量误差都在0.2%左右,信号检测结果和输入结果十分接近。

表5 PWM输入测试结果

Table 5 PWM input test results

功能	输入值	检测值	相对误差/%
边沿检测	100个	100个	0
周期测量	1 μs	1.002 μs	0.2
频率测量	1 MHz	998 kHz	0.2
脉冲测量	500 ns	501 ns	0.2
双边沿检测	500 ns	501 ns	0.2

5 系统应用实例

本多功能数据采集系统因其灵活性和适应性,可以应用于多个不同的领域。例如在环境监测领域、工业生产领域,数据采集系统通过搭载各种电压传感器可以实时监控各种参数,例如温度、压力、湿度等。下文设计一个典型的应用场景,测试物体温度以验证系统功能。具体测试框图如图18所示。

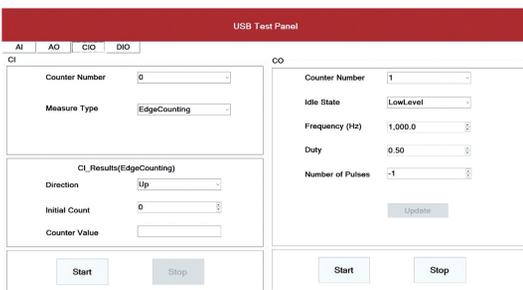


图16 PWM检测与输出界面

Fig. 16 PWM detection and output interface

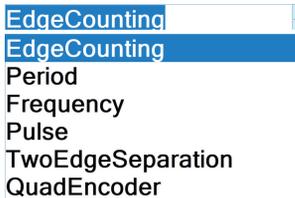


图17 Measure Type测试项

Fig. 17 Measure Type test items

1 MHz,占空比为50%的PWM信号,然后使用示波器测量CO输出信号的频率和周期,测试结果如表4所示。由表可知频率输出的相对误差在0.2%,占空比误差在0.4%,也就是一个PWM信号周期有2 ns的误差,这个误差很小。

表4 PWM输出测试结果

Table 4 PWM output test results

PWM输出	设定值	检测值	相对误差/%
频率	1 MHz	998 kHz	0.2
占空比	50%	49.8%	0.4

使用信号发生器生成100个1 MHz、占空比为50的PWM信号用以信号检测,分别检测输入信号的上升沿个数、周期的时间、频率、周期高电平以及双边沿时间,检测

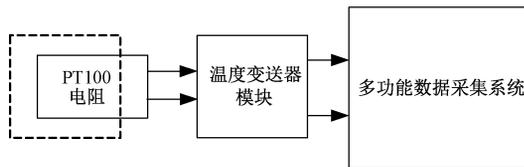


图18 实际测试框图

Fig. 18 Actual test block diagram

其中,PT100是铂热电阻,它的阻值会随着温度的变化而改变;温度变送器模块将会根据PT100电阻的阻值变化输出对应变化电压,最终0℃~100℃的温度对应0~10 V的电压;设计的多功能数据采集系统会采集变送器模块输出的电压,并将数据保存在上位机中。设计使用该测试系统测试一杯温水的温度。测试时,使用集成温度测试仪测试温水水温为50.8℃,当前环境温度为20.6℃。

系统测试结果如图19所示。图中显示的是从当前环境温度开始测量到温度稳定时的整个过程,采样速率设置为10 kS/s,整个过程共采集了19万个点。

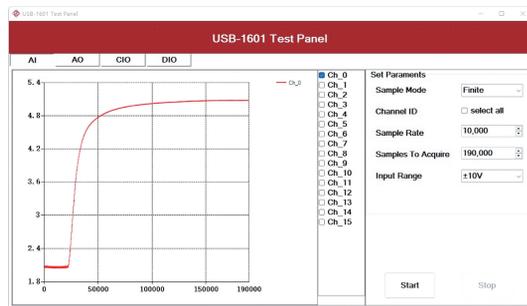


图19 实际温度测量结果

Fig. 19 Actual temperature measurement results

具体测量数据如表 6 所示,表中列举了开始测量时的前 10 个采样点的环境温度,温度在 20.594 95℃~20.626 83℃范围内;以及温度稳定时的最后 10 个采样点的水温,温度在 50.775 99℃~50.808 72℃范围内。

表 6 温度测量数据

Table 6 Temperature measurement data

采样点	采样值/V	采样点	采样值/V
0	2.059 495	189 990	5.080 872
1	2.062 683	189 991	5.078 125
2	2.061 767	189 992	5.078 735
3	2.060 852	189 993	5.080 566
4	2.059 936	189 994	5.077 209
5	2.059 631	189 995	5.079 651
6	2.060 852	189 996	5.078 125
7	2.059 884	189 997	5.077 599
8	2.059 631	189 998	5.079 651
9	2.060 241	189 999	5.077 820

由实验结果可知,系统可以通过与外部传感器结合使用来进行各种测试。这些测试不仅验证了系统的功能性和准确性,还展示了其在实际应用中的潜力。通过与不同类型的外部传感器配合,系统能够适应多种应用场景,如环境监测、工业控制和自动化等领域,从而提供了更广泛的应用可能性。

6 结 论

基于 STM32 微控制器为核心的 USB 多功能数据采集系统硬件 PCB 的长宽高分别为 93、66、7.2 mm,支持最高 1 MS/s 的最大采样率和模拟输出更新率以及最高 1 MHz PWM 信号的产生与检测,解决了传统数据采集系统便携性不足和功能局限的问题。另外,系统硬件总成本仅为 250 元人民币左右,价格具有很强的竞争力,为通用数据采集领域需求提供了高性价比的解决方案。

参考文献

- [1] 谈良, 纪凌. 基于 FPGA 的多通道数据采集系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2018, 41(5): 57-63.
TAN L, JI L. Design and implementation of a multi-channel data acquisition system based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(5): 57-63.
- [2] 林师远, 李文慧, 孙双花, 等. 基于 FPGA 的高速动态测量数据采集系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(15): 32-37.
LIN SH Y, LI W H, SUN SH H, et al. High-speed dynamic measurement data acquisition system based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(15): 32-37.

- [3] 薛倩, 王一虎. 基于 FPGA 的静电层析成像监测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 53-61.
XUE Q, WANG Y H. Research on electrostatic tomography monitoring system based on FPGA[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 53-61.
- [4] 罗义军, 陈松. 基于 PCIe 接口的高速数据采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(5): 91-95.
LUO Y J, CHEN S. High-speed data acquisition system based on PCIe interface[J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2019(5): 91-95.
- [5] 陶小亮. 基于 USB 总线的低成本舵偏角采集系统设计与应用[J]. 电子测量技术, 2021, 44(2): 43-47.
TAO X L. Design and application of a low-cost rudder deflection angle acquisition system based on USB bus[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(2): 43-47.
- [6] 杨露露. 一种低成本农作物生长环境数据采集系统[J]. 电子技术与软件工程, 2023(1): 236-239.
YANG L L. A low-cost data acquisition system for crop growth environment[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2023(1): 236-239.
- [7] 李聪, 代后兆, 张亚宁, 等. 一种新型低成本高精度热电阻测温模块的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(6): 577-584.
LI C, DAI H ZH, ZHANG Y N, et al. Development of a new low-cost high-precision RTD temperature measurement module [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(6): 577-584.
- [8] 赵明, 俞则人, 张海林, 等. 基于 USB2.0 的高速数据采集系统[J]. 信息技术, 2015(12): 10-12.
ZHAO M, YU Z R, ZHANG H L, et al. High-speed data acquisition system based on USB 2.0 [J]. Information Technology, 2015(12): 10-12.
- [9] 许刚. USB 示波分析仪的信号采集与存储模块设计[D]. 四川: 电子科技大学, 2022.
XU G. Design of signal acquisition and storage module for USB oscilloscope [D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [10] 郭敏, 庄信武, 任海波, 等. 基于 USB2.0 的多串口数据采集设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(11): 75-79.
GUO M, ZHUANG X W, REN H B, et al. Design of multi-serial port data acquisition based on USB 2.0 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(11): 75-79.

- [11] 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, 2020, 41(5):84-87.
TU X W, YU R CH, YANG Q H. Design and implementation of a multi-channel data acquisition system based on STM32 and USB[J]. Automation Instruments, 2020, 41(5): 84-87.
- [12] 辛凯,张喜验,綦声波,等. 基于STM32的海洋环境数据采集系统设计[J]. 山东科学, 2014, 27(2):8-12.
XIN K, ZHANG X Y, QI SH B, et al. Design of marine environmental data acquisition system based on STM32[J]. Shandong Science, 2014, 27(2): 8-12.
- [13] 邹连英,高宁. USB接口与上位机软件设计[J]. 自动化与仪表, 2020, 35(5):99-102.
ZOU L Y, GAO N. Design of USB interface and upper computer software [J]. Automation & Instrumentation, 2020, 35(5): 99-102.
- [14] 王志豪,张平均,李光炆,等. 基于USB-OTG端口的交流伺服驱动系统应用设计[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(2):50-52.
WANG ZH H, ZHANG P J, LI G Y, et al. Application design of an AC servo drive system based on USB-OTG port[J]. Industrial Control Computer, 2024, 37(2): 50-52.
- [15] SUNDARAM C K, GURU R P. OTG module for high speed transmission[J]. International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2016, 5(4): 180-183.
- [16] 翟瑞,周静雷. 基于STM32的USB转串口通信端口设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(1):92-95.
ZHAI R, ZHOU J L. Design of USB-to-serial communication port based on STM32 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(1): 92-95.
- [17] 赵晓娜. 一种基于STM32的USB接口数据通信方法研究[J]. 山西电子技术, 2021(2):85-87.
ZHAO X N. Research on a USB interface data communication method based on STM32[J]. Shanxi Electronic Technology, 2021(2): 85-87.
- [18] 张锦荣,王康谊,蒋茜茜,等. 嵌入式深水网箱养殖远程监控系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(2): 111-116.
ZHANG J R, WANG K Y, JIANG Q Q, et al. Design of an embedded remote monitoring system for deep water cage aquaculture[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(2): 111-116.

作者简介

陈威威(通信作者),博士,硕士生导师,主要研究方向为电路与系统。

E-mail: chenww@cqupt.edu.cn

徐会员,硕士研究生,主要研究方向为测试计量仪器。

E-mail: 2656178659@qq.com

王峰,工程师,主要研究方向为嵌入式系统开发及应用。

E-mail: feng.wang@jxinst.com