

# 多通道 SAR 型数字变换器的设计与实现

李建翔<sup>1,2</sup>, 杨玉华<sup>1,2</sup>, 刘东海<sup>1,2</sup>, 李秋媛<sup>1,2</sup>

(中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 电子测试国家重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 针对某项目多通道数字变换器的设计, 提出了一种高可靠性、高精度的模数转换方案。为完成 12 路传感器信号的采集、4 路电压电流的采集, 对硬件电路进行了详细的分析与优化。待采集信号先后通过信号调理、模拟开关、分压跟随以及抗混叠滤波对其进行处理, 并对链路的建立时间进行分析, 最后采用逐次逼近型 AD 芯片进行转换, 通过与上位机配合验证数据的采集精度。经过大量实验数据验证, 采集精度均能优于 0.5%, 达到任务要求。

**关键词:** 模数转换; 高精度采集; 信号调理; 模拟开关; 抗混叠滤波; 逐次逼近型

中图分类号: TN911.71

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200979

中文引用格式: 李建翔, 杨玉华, 刘东海, 等. 多通道 SAR 型数字变换器的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 105-109, 114.

英文引用格式: Li Jianxiang, Yang Yuhua, Liu Donghai, et al. Design and analysis of multi-channel SAR digital converter[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 105-109, 114.

## Design and analysis of multi-channel SAR digital converter

Li Jianxiang<sup>1,2</sup>, Yang Yuhua<sup>1,2</sup>, Liu Donghai<sup>1,2</sup>, Li Qiuyuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In this paper, a high-reliability and high-precision analog-to-digital conversion scheme is proposed for the design of a multi-channel digital converter in a project. In order to complete the collection of 12 channels of sensor signal and the collection of 4 channels of voltage and current, the hardware circuit is analyzed and optimized in detail. The signal to be collected is processed by signal conditioning, analog switch, voltage division follow-up and anti-aliasing filtering, and the establishment time of the link is analyzed. Finally, the successive approximation AD chip is used for conversion. Verification of data collection accuracy through cooperation with the host computer. After a lot of experimental data verification, the collection accuracy can be better than 0.5%, meeting the task requirements.

**Key words:** analog-to-digital conversion; high precision acquisition; signal conditioning; analog switch; anti-aliasing filtering; successive approximation register

## 0 引言

伴随着当今电子技术的迅猛发展, 集数据的采集、传输以及存储功能为一体的设备体积越来越小, 被广泛应用于各种测试实验当中, 由于测试测量任务中参数众多, 而且对每一个指标的要求各不相同, 细微的环境影响就可能导致采集结果的误差增加, 因此对数据的采集提出越来越高的要求<sup>[1]</sup>。

数字变换器是将采集到的模拟量信号进行量化处理, 将多种转换后的数字量信号进行打包编帧, 通过 RS422 接口将数据传输到上位机进行校验。本次设计中, 对多路传感器信号、电压信号、电流信号进行采集, 重点从电路的设计方面对其进行优化, 并对其进行了详细的

性能测试, 相较于传统的测试系统, 采集的信号精度更高, 更加稳定可靠。

## 1 总体设计方案

该数字变换器用于完成对系统外参数的采集、编码, 完成 12 路传感器信号的采集、完成对 +5 V 和 +12 V 输出电压、电流的采集工作, 采样率均为 80 Hz, 采编误差并不大于 0.5%, 最后将数据通过数字量接口发送到上位机进行校验。总体设计方案如图 1 所示。

## 2 电路设计方案

根据任务要求, 模拟量采集电路需要采集多路不同的信号, 采集电路元器件的选型将直接影响到采集电路的精度等参数, 因此电路设计及元器件选型至关重要。

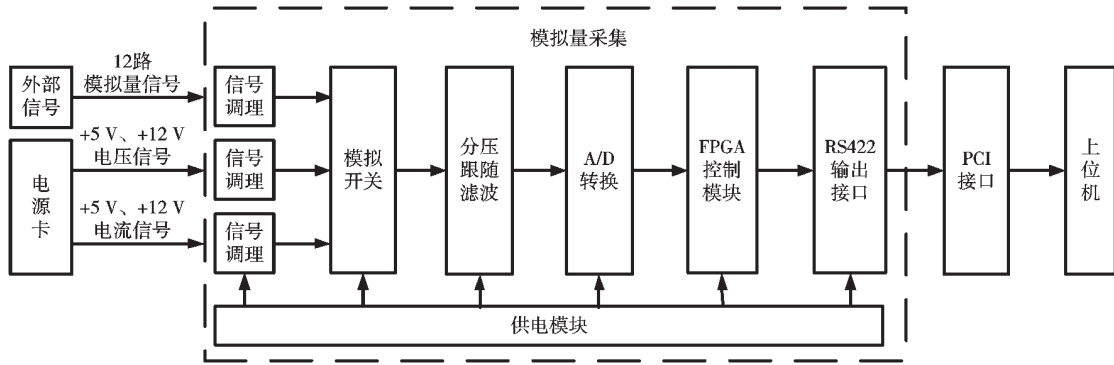


图1 系统总体设计方案

采集电路需包括信号调理模块、模拟开关模块、驱动模块以及模数转换模块,转换后将数据送入 FPGA 中进行处理,最后将数据通过 RS422 接口送入上位机。

2.1 信号调理

为了消除原始信号中的噪声与干扰,需要对其进行调理。信号调理电路能够对模拟信号放大、缓冲以及定标,减弱原始信号中的噪声积累,提升信号的抗干扰能力<sup>[2]</sup>,将其转化为适合模数转换电路(ADC)的输入,进而 ADC 对其进行数字化处理并将其送入 FPGA 中,便于系统的处理。

2.1.1 传感器信号与电压信号调理

运放作为调理电路的关键器件,本设计选取 ADI 公司的 AD8608 运算放大器芯片,该芯片将诸多优良特性相结合,在单电源供电的同时具备四路轨-轨的输入输出,在保证高速度的同时也能保证极低的噪声和输入偏置电流,广泛适用于各种电路<sup>[3]</sup>。一些运放当遇到输入电压超过自身最大共模电压时,会使输出相位反转,造成不可逆的损害,而 AD8608 具备处理比电源电压高出 2 V 的能力,从而能够有效抑制相位反转情况<sup>[4]</sup>。传感器信号调理电路如图 2 所示,主要组成部分为  $R_1$ 、 $C_1$  构成的一阶低通滤波电路以及由 AD8608 为核心的电压跟随器。

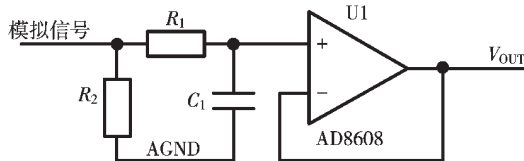


图2 传感器信号调理电路

由于运放的输入阻抗一般都很高,当输入引脚悬空时,极易受到外界干扰<sup>[5]</sup>,因此设置  $R_2$  电阻可以在输入引脚悬空时,能够使输入端与模拟地形成回路,保证运放的稳定性。在运放 U1 前端串接电阻  $R_1$ ,能够有效防止输入电压过大而导致运放出现损坏,  $V_{IN}$  为运放的输入电压,  $V_S$  为运放本身的供电电压,  $V_{IN}$ 、 $V_S$ 、 $R_1$  三者的关系如式(1)所示,取值范围一般为  $5\text{ k}\Omega\sim 10\text{ k}\Omega$ ,本设计在此选用  $10\text{ k}\Omega$ 。

$$\frac{V_{IN}-V_S}{R_1} \leq 5\text{ mA} \tag{1}$$

电阻  $R_1$  的另一作用是和电容  $C_1$  组成一阶 RC 低通滤波电路,能够有效滤除高于奈奎斯特频率的噪声信号<sup>[6]</sup>。由于低通滤波器会导致相位滞后,根据实际允许的基本衰减范围其截止频率一般设置为  $5\sim 10$  倍,且本设计中待采集信号采样率均为  $80\text{ Hz}$ ,因此设计截止频率为  $884\text{ Hz}$  的滤波器,根据式(2)确定  $C_1$  容值为  $0.018\text{ }\mu\text{F}$ 。这种低通滤波的缺点是带负载能力差,因此在其后端接入一个电压跟随器,提高电路驱动能力。

$$f = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \tag{2}$$

在电压调理电路中,电路如图 3 所示,轨到轨运放能最大限度使输入和输出电压摆幅接近电源电压值,但在大电流情况下同样存在较大偏差,由于 AD8608 的输入电压范围为  $0\sim 5\text{ V}$ ,因此设置  $R_3$  和  $R_5$  组成分压电路,将输入电压降到  $5\text{ V}$  以下。当输入为  $5\text{ V}$  时,  $R_3$  选用  $1\text{ k}\Omega$  电阻,  $R_5$  选用  $10\text{ k}\Omega$  电阻,因此输入的电压为:

$$5\text{ V} \times \frac{10\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega + 10\text{ k}\Omega} = 4.54\text{ V} \tag{3}$$

当输入为  $12\text{ V}$  时,  $R_3$  选用  $3\text{ k}\Omega$  电阻,  $R_5$  选用  $2\text{ k}\Omega$  电阻,输入电压为:

$$12\text{ V} \times \frac{2\text{ k}\Omega}{2\text{ k}\Omega + 3\text{ k}\Omega} = 4.8\text{ V} \tag{4}$$

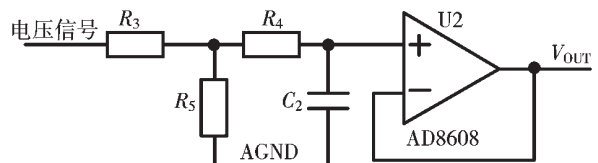


图3 电压信号调理电路

2.1.2 电流信号调理

针对电流的大小、交直流的区别,相对应的电流采集方法也不尽相同,常用的电流采集方法有同轴分流器法、电流互感器法、罗氏线圈法、霍尔传感器法以及采样电阻法等<sup>[7]</sup>。霍尔传感器法同时适用于交流直流电流的测量,且可以进行大电流测量,其原理如图 4 所示。根据

霍尔效应, 电流  $I$  在霍尔元件两端流过时, 在其垂直方向施加磁感应强度为  $B$  的磁场, 就会产生霍尔电压  $U$ , 影响霍尔传感器精度的因素主要是其本身的线性度和测量误差<sup>[8]</sup>, 其大小为:

$$U = \frac{kIB}{d} \quad (5)$$

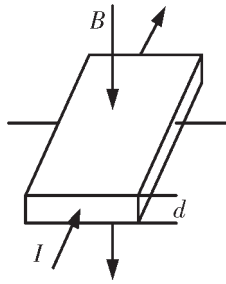


图4 霍尔元件测电流原理

电流采集电路使用的是 Allegro 公司的 ACS714 芯片, 该芯片是一种电流隔离式的、具有共模抑制场效应的电流传感器, 由高精度低偏置线性霍尔传感器组成<sup>[9]</sup>, 能够使输出电压与输入电流大小呈线性关系, 本文所选用的 ACS714 芯片最大采样电流为 5 A, 其输入电流与输出电压之间的关系如图 5 所示, 其同时具备 80 kHz 的带宽频率, 灵敏度典型值为 185 mV/A, 在空载时  $V_{IOUT}$  输出为  $V_{CC}/2$ <sup>[10]</sup>。电路设计如图 6 所示, 电流从 1、2 引脚的 IP+ 端口流入, 从 3、4 引脚的 IP- 端口流出, 6 引脚 FILTER 为外部设置带宽的端口, 7 引脚  $V_{IOUT}$  为模拟信号输出端口, 随后接入放大器对电压进行放大处理,  $V_{IOUT}$  的输出电压可根据图 5 的线性关系获得, 经放大之后输出电压  $V_{OUT}$  大小为:

$$V_{OUT} = 2.5 V \times (1 + \frac{R_9}{R_8}) - V_{IOUT} \times \frac{R_9}{R_8} \quad (6)$$

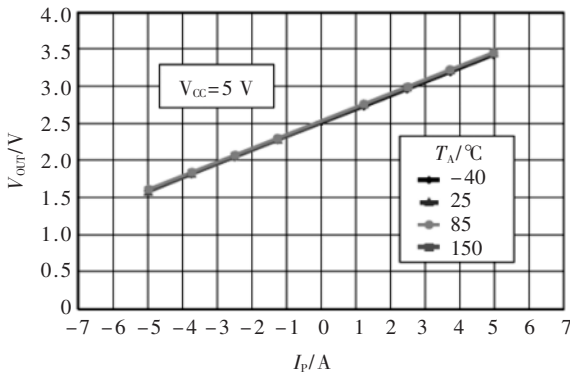


图5 ACS714 输入电流与输出电压对应关系

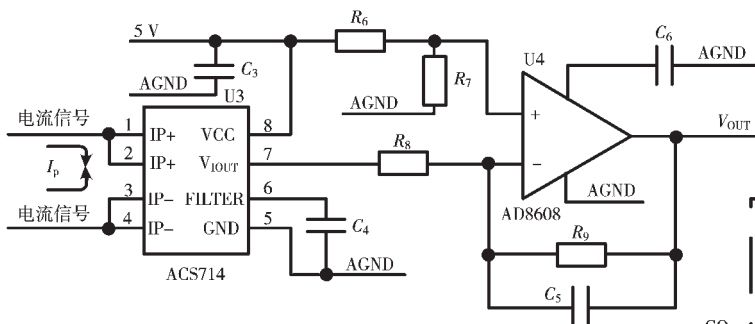


图6 电流信号调理电路

## 2.2 模拟开关切换电路

通过 FPGA 控制模拟开关选通地址切换通道以达到

分时复用的效果, 当在切换通道时模拟开关会影响到容性负载的变化, 出现如信号振荡或者振铃现象, 而模拟开关切换速度越快此现象越明显<sup>[11]</sup>, 因此模拟开关的选型显得尤为重要, 通过分析对比多种不同类型的模拟开关, 本设计采用 ADG706 芯片, 模拟开关等效电路如图 7 所示。

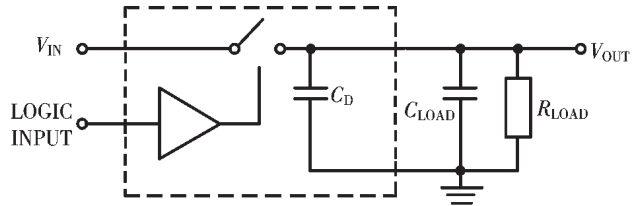


图7 模拟开关等效电路

模拟开关建立时间与其自身开关导通电阻  $R_{ON}$  以及开关漏极电容  $C_D$  有关外, 还与负载阻容的大小有紧密联系。在模拟开关 ADG706 以及其后级放大器 AD8031 均为 5 V 电源供电的情况下, 负载电阻  $R_{LOAD}$  为 40 M $\Omega$ , 负载电容  $C_{LOAD}$  为 1.6 pF。因此模拟开关建立 16 位精度所需的建立时间可根据式(7)所得。

$$\begin{cases} T_{SETTLE\_MUX} = T_{TRANSITION} + T_{LOAD} \\ T_{LOAD} = [\frac{R_{ON} \times R_{LOAD}}{R_{ON} + R_{LOAD}} \times (C_{LOAD} + C_D) \times \text{时间常数}] \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,  $T_{TRANSITION}$  为 ADG706 典型转换时间 40 ns,  $R_{ON}$  在此取最大导通电阻 5  $\Omega$ , 开关漏极电容  $C_D$  为 200 pF, 时间常数通过查阅芯片资料为 11.09, 因此可求得模拟开关建立时间约为 51.18 ns。且 ADG706 通道数为 16, 则可由式(8)计算出在此电路中最大采样速率为 1.2 MS/s。

$$f_s = \frac{1}{T_{SETTLE\_MUX} \times \text{通道数量}} \quad (8)$$

## 2.3 分压跟随与抗混叠滤波

信号经过模拟开关要经过分压、跟随、滤波电路, 随后输入到 AD 转换器中, 电路如图 8 所示。电压跟随器使电路呈现高阻输入以及低阻输出, 提升电路的带负载能力<sup>[12]</sup>。为提高信噪比, 在输出端口前增加一个抗混叠低通滤波器, 以滤除信号中的高频噪声, 这里截止频率设置为 10.61 MHz。由于 AD7667 的电压输入范围是 0~2.5 V, 因此设置  $R_{11}$  和  $R_{12}$  组成分压电阻, 将电压调整至满足 AD 转换电路的输入要求, 输出范围如式(9)所示:

$$(0 V \sim 5 V) \times \frac{10 k\Omega}{10 k\Omega + 15 k\Omega} = (0 V \sim 2 V) \quad (9)$$

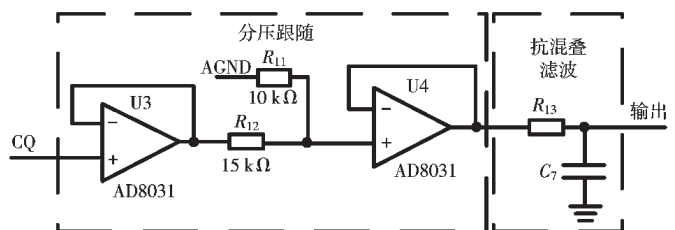


图8 分压跟随与抗混叠滤波电路

由于在模拟开关多路复用的状态下,不同的信号可能产生较大的电压阶跃,若建立时间不满足条件则可能产生串扰误差,需对其进行详尽的计算<sup>[13]</sup>。在5V电源供电情况下,AD8031压摆率的典型值为32V/ $\mu$ s<sup>[14]</sup>,当输入电压最大为2V时,AD8031稳定到0.1%的误差范围内的典型建立时间为125ns,而当最大输入电压超过2V时,芯片资料并未给出具体建立时间,且误差大小与建立时间并不是线性关系,因此只能根据压摆率进行估算。在第一级运放U3中最大输入电压为5V,所以运放U3的建立时间 $T_2$ 大约为:

$$T_2 = \frac{3}{32} \times 10^3 + 125 = 218.75 \text{ ns} \quad (10)$$

第二级运放U4输入最大电压为2V,所以其建立时间 $T_3$ 为125ns,抗混叠滤波网络所需建立时间 $T_4$ 为:

$$T_4 = \text{时间常数} \times RC = 11.09 \times 15 \Omega \times 1000 \text{ pF} = 166.35 \text{ ns} \quad (11)$$

模拟链路总建立时间 $T$ 为:

$$T = \sqrt{T_{\text{SETTLE\_MUX}}^2 + T_2^2 + T_3^2 + T_4^2} \approx 306.22 \text{ ns} \quad (12)$$

因AD转换芯片选用的是AD7667芯片,正常工作模式下其采样率为800kHz,即采样周期为1250ns,而模拟链路总建立时间约为306.22ns,因此可满足采样要求。

### 2.4 AD转换电路

模数转换器(ADC)针对不同的应用场景可选用不同架构的ADC,常见的有 $\Sigma$ - $\Delta$ 型、流水线型、逐次逼近型(SAR)等,逐次逼近型ADC具有低功耗以及高分辨率的显著优点<sup>[15]</sup>,因此被广泛应用于工业领域,本设计采用逐次逼近型的AD7667芯片,具备16位分辨率,基准参考电压 $V_{\text{REF}}$ 为2.5V,采用5V单电源供电,在Warp模式下最大吞吐量为1MS/s,正常模式中最大吞吐量也能达到800kS/s,完全能够满足系统所需要的采集速度。

SAR型ADC转换器原理图如图9所示,量化过程实质是逐次改变采样电压所在的量化区间,与采样电压的实际值逐次逼近<sup>[16]</sup>。以16位ADC为例,当转换脉冲到来时,先将移位寄存器置为1000000000000000,将其送入

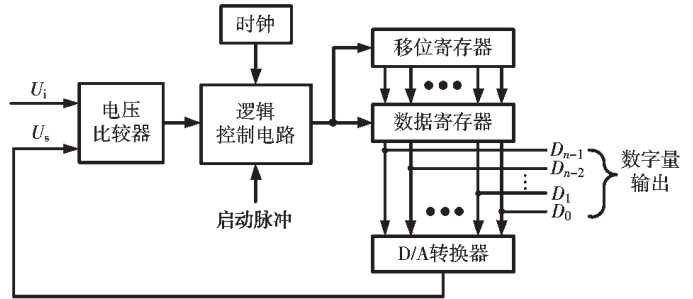


图9 SAR型A/D转换器原理图

D/A转换器中,此时D/A转换器的输出电压为 $U_s = V_{\text{REF}}/2$ ,将输入电压与 $U_s$ 相比较,若 $U_i \geq U_s$ ,则数据寄存器的最高位 $D_{n-1}$ 置1,否则置0。当第二个时钟到来时,移位寄存器使次高位置1,如果数据寄存器此时最高位已置1,则D/A转换器输出电压为 $U_s = 3V_{\text{REF}}/4$ ;如果数据寄存器最高位为0,则D/A转换器输出电压为 $U_s = V_{\text{REF}}/4$ ;此时进行比较,若 $U_i \geq U_s$ ,则数据寄存器的次高位 $D_{n-2}$ 置1,否则置0……以此类推,比较一次得出一位,最终在完成 $n$ 次比较后得出 $n$ 位的数字量。

### 3 数据采集精度测试

通过对硬件电路的分析与搭建,需对其性能进行完整测试,利用上位机软件对采集数据进行分析。采集后的数据通过RS422接口送入上位机,并在逻辑设计中数据预先进行编帧处理,图10为某次测试的数据结果,数据格式如图所示。

为更加直观地体现数据的波动程度,利用上位机对数据进行绘图处理。由于整个电路系统对模数转换造成的细微偏差,为了准确表征模拟量与数字量之间的对应关系,运用最小二乘法对数据进行标定,计算出其系数后写入上位机,可将采集到数据以模拟量的形式显示出来,如图11、图12所示。例如图11在模拟通道1中,MAX=217.00,MIN=210.00, $\Delta=7.00$ ,则误差为7/65535=0.01068%。在电压电流采集,例如5V电压中MAX=47184.00,MIN=47140.00, $\Delta=44.00$ ,则误差为44/65535=

帧头	12路模拟量数据	5V电压	12V电压	12V电流	帧计数	帧尾
00 06 00	00 D4 00 D5 00 D5 00 D4 00 D7 00 D6 00 D8 00 D5 00 D7 00 D4 00 D4 00 D5 B8 48 5B 00 9A 53 50 F3 00 00 2B 93 00 F4 5A FE ZT					
00 0637	5A 54 A1 00 D5 00 D6 00 D5 00 D5 00 D4 00 D6 00 D6 00 D7 00 D5 00 D4 00 D6 B8 46 59 F7 9A 62 50 BE 00 00 2B 9E 00 BD 5A FE ZT					
00 0642	5A 54 A1 00 D6 00 D4 00 D6 00 D5 00 D6 00 D4 00 D6 00 D3 00 D7 00 D5 00 D4 00 D6 B8 44 59 6E 9A 15 51 69 00 00 2B 9F 00 95 5A FE ZT					
00 068D	5A 54 A1 00 D6 00 D6 00 D5 00 D5 00 D6 00 D3 00 D6 00 D5 00 D8 00 D6 00 D7 00 D4 B8 3C 5A 58 9A 9F 51 0C 00 00 2B A0 00 AA 5A FE ZT					
00 068B	5A 54 A1 00 D6 00 D5 00 D4 00 D7 00 D6 00 D6 00 D4 00 D5 00 D4 00 D9 00 D5 00 D6 B8 45 59 2B 9A 95 50 CA 00 00 2B A1 00 3A 5A FE ZT					
00 06E3	5A 54 A1 00 D3 00 D4 00 D5 00 D6 00 D6 00 D4 00 D6 00 D5 00 D5 00 D6 B8 3F 59 A7 9A 62 51 8D 00 00 2B A2 00 3B 5A FE ZT					
00 070E	5A 54 A1 00 D4 00 D5 00 D3 00 D5 00 D7 00 D5 00 D7 00 D5 00 D4 00 D4 00 D4 00 D7 B8 43 5A 76 9A 15 50 08 00 00 2B A3 00 3A 5A FE ZT					
00 0739	5A 54 A1 00 D6 00 D8 00 D4 00 D4 00 D6 00 D5 00 D4 00 D7 00 D4 00 D5 00 D4 00 D3 B8 42 5A A1 9A B0 50 A3 00 00 2B A4 00 3E 5A FE ZT					
00 0764	5A 54 A1 00 D7 00 D5 00 D5 00 D4 00 D5 00 D6 00 D6 00 D7 00 D6 00 D5 00 D4 B8 42 58 A0 99 DC 51 BC 00 00 2B A5 00 E6 5A FE ZT					
00 078F	5A 54 A1 00 D6 00 D6 00 D7 00 D4 00 D6 00 D6 00 D6 00 D9 00 D4 00 D5 00 D4 B8 46 59 A2 99 DA 51 15 00 00 2B A6 00 44 5A FE ZT					
00 078A	5A 54 A1 00 D8 00 D5 00 D7 00 D4 00 D6 00 D4 00 D4 00 D6 00 D6 00 D6 00 D5 B8 42 5A 07 9A 17 50 75 00 00 2B A7 00 46 5A FE ZT					
00 07E5	5A 54 A1 00 D5 00 D4 00 D7 00 D4 00 D6 00 D4 00 D4 00 D5 00 D4 00 D7 00 D6 B8 42 59 8C 99 E0 50 00 00 00 2B A8 00 F2 5A FE ZT					
00 0810	5A 54 A1 00 D5 00 D3 00 D6 00 D5 00 D7 00 D5 00 D4 00 D5 00 D4 00 D6 00 D5 B8 46 5A 15 9A 5C 51 67 00 00 2B A9 00 6B 5A FE ZT					
00 0818	5A 54 A1 00 D5 00 D4 00 D5 00 D5 00 D7 00 D4 00 D7 00 D4 00 D5 00 D3 00 D7 B8 45 59 79 9A 43 50 DC 00 00 2B AA 00 4B 5A FE ZT					
00 0866	5A 54 A1 00 D5 00 D5 00 D6 00 D5 00 D6 00 D6 00 D4 00 D5 00 D5 00 D4 00 D6 B8 3A 59 AF 9A 89 52 0E 00 00 2B AB 00 F2 5A FE ZT					
00 0891	5A 54 A1 00 D5 00 D4 00 D6 00 D4 00 D7 00 D6 00 D6 00 D6 00 D3 00 D5 00 D3 00 D6 B8 44 58 73 9A 89 50 60 00 00 2B AC 00 0D 5A FE ZT					
00 08BC	5A 54 A1 00 D6 00 D5 00 D3 00 D5 00 D4 00 D5 00 D5 00 D7 00 D5 00 D5 00 D6 B8 4A 59 88 9A 7E 50 DA 00 00 2B AD 00 9D 5A FE ZT					
00 08E7	5A 54 A1 00 D6 00 D7 00 D6 00 D4 00 D4 00 D5 00 D4 00 D6 00 D7 00 D7 00 D6 B8 41 59 8D 9A 2A 50 BA 00 00 2B AE 00 2B 5A FE ZT					
00 0912	5A 54 A1 00 D4 00 D5 00 D5 00 D6 00 D5 00 D6 00 D6 00 D5 00 D4 00 D6 00 D4 00 D5 B8 44 59 18 9A 91 50 B7 00 00 2B AF 00 17 5A FE ZT					

图10 数据格式

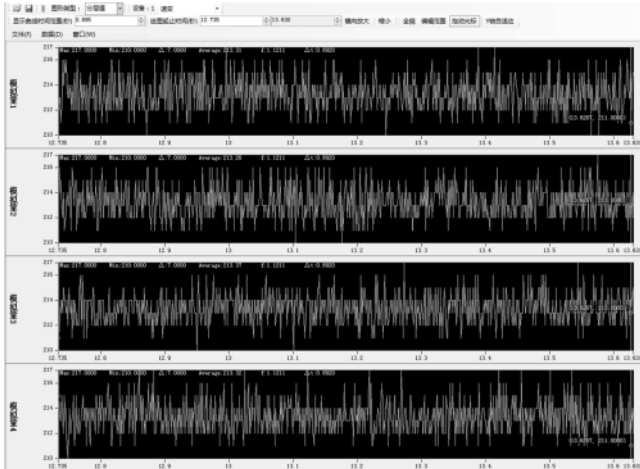


图 11 传感器通道数据绘图

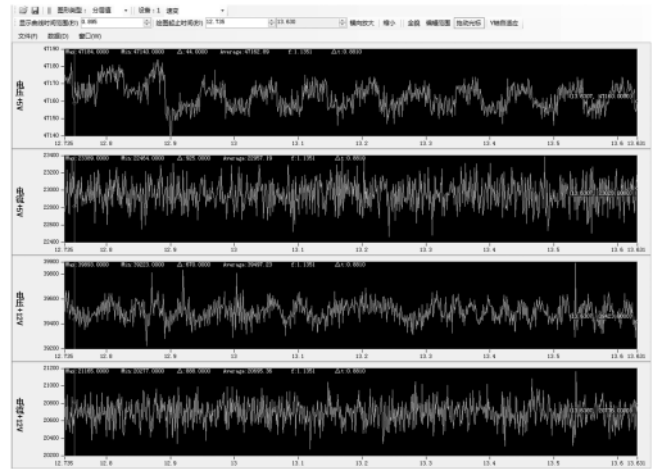


图 12 电压电流通道数据绘图

0.067 14%。经过大量的实验数据分析,采集精度均能满足要求。

#### 4 结论

为了实现对信号的高精度采集,本文通过对多通道 SAR 型模数转换硬件电路的分析,设计了一种高精度、多通道的数字变换器,经过大量实验验证其具备很高的可靠性,能够满足任务要求。

#### 参考文献

- [1] 师明,王保丰,曹玉娟,等.面向航天器飞控任务的大数据处理系统的设计与验证[J].航天器工程,2018,27(6):69-76.
- [2] 储成君.基于 FPGA 的多通道模数混合采集装置的设计及实现[D].太原:中北大学,2014.
- [3] 李海兰,李刚.精密低噪声 CMOS 轨-轨运算放大器 AD8605/AD8606/AD8608[J].电子元器件应用,2006(1):106-107,116.
- [4] 高旭彬.通用型运放输出摆动范围的实验与分析[J].电子技术,2013,42(8):61-62,54.
- [5] 瞿林.基于 CAN 总线的分布式温度采集系统的设计与实现[D].太原:中北大学,2015.
- [6] 马青.高速数据采集信号调理电路的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
- [7] 史帅.宽带高精度功率分析仪通道设计与实现[D].成都:电子科技大学,2019.
- [8] 董耀文.电动汽车用霍尔电流传感器的设计[D].南京:南
- [9] 师明,王保丰,曹玉娟,等.面向航天器飞控任务的大数据处理系统的设计与验证[J].航天器工程,2018,27(6):69-76.
- [10] 侯宏录,张文芳.基于 FPGA 的 SDRAM 控制器设计方案[J].兵工自动化,2012,31(2):57-60.
- [11] 杨腾.基于 FPGA 的应用于 STM32 的 SDRAM 控制器设计方案[J].智库时代,2019(7):254-257.
- [12] 贺婷.基于乒乓数据存储机制的 FPGA 视频监控系统设计[J].电脑知识与技术,2015,11(31):189-190.
- [13] 吴明阳.基于 FPGA 的高速数据采集系统的设计分析[J].数码世界,2019(1):6-7.
- [14] 周欢,陈剑云,钟汉华.基于 Xilinx IP 核的任意信号发生

- [3] 李海兰,李刚.精密低噪声 CMOS 轨-轨运算放大器 AD8605/AD8606/AD8608[J].电子元器件应用,2006(1):106-107,116.
- [4] 高旭彬.通用型运放输出摆动范围的实验与分析[J].电子技术,2013,42(8):61-62,54.
- [5] 瞿林.基于 CAN 总线的分布式温度采集系统的设计与实现[D].太原:中北大学,2015.
- [6] 马青.高速数据采集信号调理电路的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
- [7] 史帅.宽带高精度功率分析仪通道设计与实现[D].成都:电子科技大学,2019.
- [8] 董耀文.电动汽车用霍尔电流传感器的设计[D].南京:南

(下转第 114 页)

(上接第 104 页)

- [6] 房曙光.低压电力线通信信道特性[J].继电器,2007,35(22):53-56.
- [7] 杨挺,刘佳林,张亚健,等.电力线载波通信时频混合降噪方法[J].电网技术,2018,42(10):3153-3160.
- [8] 王永利.基于 FPGA 的带寄存器寻址 SPI 接口设计[J].物联网技术,2013(3):45-47.
- [9] 陆鹏.一种从机 SPI 通信接口的 FPGA 设计与实现[J].信息通信,2020(3):142-143.
- [10] 侯宏录,张文芳.基于 FPGA 的 SDRAM 控制器设计方案[J].兵工自动化,2012,31(2):57-60.
- [11] 杨腾.基于 FPGA 的应用于 STM32 的 SDRAM 控制器设计方案[J].智库时代,2019(7):254-257.
- [12] 贺婷.基于乒乓数据存储机制的 FPGA 视频监控系统设计[J].电脑知识与技术,2015,11(31):189-190.
- [13] 吴明阳.基于 FPGA 的高速数据采集系统的设计分析[J].数码世界,2019(1):6-7.
- [14] 周欢,陈剑云,钟汉华.基于 Xilinx IP 核的任意信号发生

- [15] 沈龙龙,李军旗,于水游.基于 FPGA 的 1024 点 FFT 在信号实时解码处理中的实现[J].光电技术应用,2020,35(3):67-72,77.
- [16] 张月,陶林伟.基于 FPGA 与 STM32 的多通道数据采集系统[J].西北工业大学学报,2020,38(2):351-358.
- [17] 杨爱冰,董天强,陈波,等.低压电力线信道传输特性测量与研究[J].实验室研究与探索,2017,36(1):136-139,143.

(收稿日期:2020-11-16)

#### 作者简介:

郝伟琦(1989-),通信作者,男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力通信与计算机网络技术,E-mail:haoweiqi@sgitg.sgcc.com.cn。

王贤辉(1983-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力通信与计算机网络技术。

李铮(1979-),男,学士,工程师,主要研究方向:电力通信与计算机网络技术。



扫码下载电子文档

的接口输入和输出信号分别进行了采集,功能覆盖率达到到了100%。对于传统的基于testbench的验证平台,缺少特定的方法对功能覆盖率进行统计,很难收集并分析功能覆盖率的具体情况。

图9描述的是DUT的代码覆盖率,其中,分支覆盖率、条件覆盖率、表达式覆盖率和语句覆盖率均达到了100%,总代码覆盖率也达到100%。

Instance	Design unit	Total coverage	Covergroup	Design unit ty
/pie_top_tb	pie_top_tb	100%		Module
/pie_top_tb/my_pie	pie_encode	100%		Module

图9 代码覆盖率

4 结论

UVM验证方法学作为如今IC验证领域最广泛使用的验证方式,其拥有大量库及基类、面向对象等特点,有效提高了验证效率和产品可靠性。本文设计了RFID阅读器发送链路PIE编码模型,在建模、仿真的基础上进一步实现了FPGA原型验证,进而实现了FPGA串口多字节发送的功能以及和PC的通信。此外,基于UVM验证方法学及SystemVerilog语言特性,借助DPI调用高抽象层次C模型,搭建了具有高度复用性的功能全面的验证平台,在此基础上编写覆盖率驱动的受约束随机激励,实现了SystemVerilog和C语言协同仿真。最终使得代码的分支覆盖率、条件覆盖率、表达式覆盖率、语句覆盖率均达到100%,总覆盖率达到100%,功能覆盖率也达到100%,达到了验证目的。

参考文献

[1] 崔璐.UHF RFID阅读器的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2014.

[2] 苏渊.基于UVM的AES模块验证平台设计[D].西安:西安电子科技大学,2018.

[3] ISO 18000-6, Information technology-Radio Frequency Identification for Item management-Part 6:Parameters for air interface communications at 860MHz to 960MHz,2006.

[4] 张强.UVM实战[M].北京:机械工业出版社,2014.

[5] 吴迪飞.基于UVM的FPGA数字下变频模块级验证方法的实现[J].电脑知识与技术,2020,16(10):269-272.

[6] 习建博,朱鹏,崔留争.基于UVM方法的FPGA验证技术[J].电子科学技术,2016,3(3):204-207.

[7] 魏小义.基于Transaction模式的SoC软硬件协同验证方法研究[D].成都:电子科技大学,2006.

[8] 徐飞,秦水介.基于UVM的基带射频接口电路的验证[J].电子技术应用,2018,44(3):11-14.

[9] TASIRAN S, KEUTZER K. Coverage metrics for functional validation of hardware designs[J]. IEEE Design & Test of Computers, 2001, 18(4).

[10] 李璐,周春良,冯曦,等.基于DPI-C接口的可扩展SOC验证平台[J].电子设计工程,2018,26(4):136-140.

[11] 赵经天.基于UVM的SAS控制器模块验证[D].杭州:杭州电子科技大学,2019.

[12] 郑昌立.基于UVM的仿真用例集约简技术研究[D].杭州:浙江大学,2020.

[13] 赵赛,闫华,丛红艳.基于UVM验证方法学的数字交换芯片验证平台[J].电子与封装,2019,19(12):36-40.

[14] 乔鹏丽,吕英杰.基于SystemVerilog的数字基带通信芯片的验证[J].南开大学学报(自然科学版),2020,53(6):1-4.

[15] 车来晟,唐鹤,高昂,等.一款10位逐次逼近型模数转换器设计[J].电子与封装,2019,19(7):16-19,23.

[16] 沈泓翔.一种过采样20-bit SAR ADC的研究与设计[D].成都:电子科技大学,2018.

(收稿日期:2020-10-19)

作者简介:

李姝萱(1997-),通信作者,女,硕士,主要研究方向:数字IC验证,E-mail:1026568754@qq.com.

卜刚(1969-),男,教授,主要研究方向:集成电路设计。



扫码下载电子文档

(上接第109页)

京航空航天大学,2019.

[9] 徐鼎.基于虚拟仪器的电能采集分析回放装置的研究与设计[D].济南:山东大学,2018.

[10] Allegro.The Datasheet of ACS714 Designer manual[Z].2006.

[11] 张志明,李蓉艳,王磊.等精度频率信号采集测试系统[J].仪器仪表学报,2002(S1):159-160.

[12] 胡伟.宽动态范围高精度程控增益放大器的研究与设计[D].广州:华南理工大学,2016.

[13] 葛立,李骥,高枫,等.多路模拟开关在数据采集系统中的应用与分析[J].电子技术应用,2014,40(12):40-42.

[14] 袁强,焦新泉,方炜,等.基于FPGA的多通道遥测采编

器设计[J].传感器与微系统,2015,34(12):97-100.

[15] 车来晟,唐鹤,高昂,等.一款10位逐次逼近型模数转换器设计[J].电子与封装,2019,19(7):16-19,23.

[16] 沈泓翔.一种过采样20-bit SAR ADC的研究与设计[D].成都:电子科技大学,2018.

(收稿日期:2020-10-07)

作者简介:

李建翔(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:电路设计、动态测试。

杨玉华(1977-),女,硕士生导师,副教授,主要研究方向:微纳器件与系统、动态测试与存储、电路与系统。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所