

基于FPGA的高精度模拟量输出卡设计*

胡晓捷 焦新泉 贾兴中

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对遥测系统中采集模拟量信号精度低、质量差等问题,本文在模拟量信号日益精度化、多样化、复杂化的趋势下设计了更为高精度的模拟量输出卡。本设计采用了以现场可编程门阵列(FPGA)为中心的逻辑控制器、16位高精度的数模转换器LTC2642实现了DA的高精度转换,输出的模拟量信号通过16位通道的模拟开关ADG1606将96路信号切换输出,输出信号自检通过模拟开关以每路175 ns的切换速率将模拟量信号轮循环切换采集,保证了输出信号的高质量回采。经过设计论证和测试,输出信号精度达到设计要求的 $\pm 0.15\%$,回采信号精度达到设计要求的 $\pm 0.1\%$,表明输出的模拟量信号精度高、稳定性好。

关键词: 高精度;FPGA;模拟量;多通道;LTC2642

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Design of high precision analog output card based on FPGA

Hu Xiaojie Jiao Xinquan Jia Xingzhong

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, State Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of low precision and poor quality of analog signal acquisition in telemetry system, In this paper, a higher precision analog output card is designed under the trend of increasingly accurate, integrated and complex analog signal. In this design, FPGA centered logic controller and 16 bit high-precision DA converter are used to realize the high-precision DA conversion. The analog signal is switched out through the analog switch adg1606 with 16 bit channel, The output signal self check collects the analog signal in a round-loop switching mode at the switching rate of 175ns per channel through the analog switch, which ensures the high-quality acquisition of the output signal. After the design demonstration and test, the output voltage precision meets the design requirements $\pm 0.15\%$, the recovery voltage signal meets the design requirements $\pm 0.1\%$, which indicates that the output of analog signal is stable and reliable.

Keywords: high-precision;FPGA;analog quantity;multichannel;LTC2642

0 引言

随着遥测信号要求的不断提高,高精度模拟量信号对于遥测设备至关重要,针对以往模拟量信号精确度低^[1]、稳定性差等特点,因此设计高精度模拟量信号输出卡非常重要。

高精度的模拟量信号对于模拟外界压力、温度等信号十分关键,所以对输出高模拟量信号不断改进。根据以往设计输出48路模拟量信号输出卡,精度低的特点。本次设计不仅增加了输出通道而且可输出精度优于 $\pm 0.15\%$ 的模拟量信号,同时增加了高精度输出电压信号回采功能,对于

输出信号检测有着重大的意义,输出信号的检测增强了信号的可信度,方便在联试时查找问题,其中对于回采信号的精度提高也是此次设计的突破点,回采电压信号的精度优于 $\pm 0.1\%$ 。

1 总体方案设计

根据任务书所提的任务要求,控制器需要精确的采集模拟量上传感器0~5 V的电压信号,模拟量卡输出96路0~5 V的模拟信号,每一路输出通道的波形和幅值均可单独设置。所以模拟量卡输出电压信号的精确度越高,对于控制器采集到的模拟信号越具有价值。出于经济和实际性

收稿日期:2021-05-18

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFF01010500)项目资助

的需求,本设计采用了Xilinx公司的高可靠性现场可编程门阵列(field programmable gate array,FPGA)作为板卡的核心器件来控制整个电路的工作,型号是XC7A100T-FGG484,具有101 440个逻辑单元,数据传输速率6.25 GB/s。

以输出高精度模拟量信号^[2]为设计核心,系统方案设计如图1所示,上位机通过PCI数据总线与FPGA^[3]进行

数据传输,数据通过16 bit的高精度DA以及信号调理电路转化模拟量信号输出;输出的模拟信号经过信号调理电路以及AD转换后将信号传递给FPGA。上位机下发自检指令,经过比较上位机的回采电压值与万用表测得输出电压值,测试^[4]得出回采电压精度达到±0.1%,总体框如图1所示。

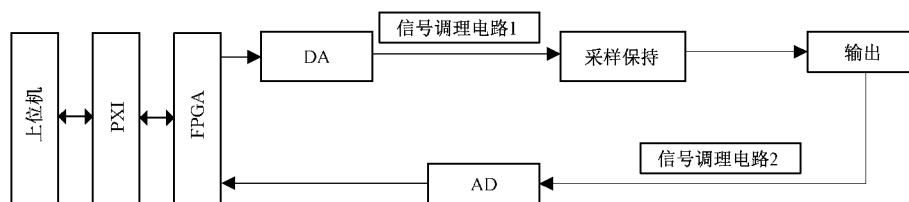


图1 模拟量信号输出卡总体框图

2 硬件设计

2.1 供电电路设计

供电电路的设计是为了给模拟量^[6]输出卡的AD芯片、DA芯片、模拟开关以及运算放大器供电。电源芯片实现的是+12 V到±7.5 V的转换。电源芯片采用的是LINER公司的LTM8002,LTM8002具有低噪声、高切换频率以及较低的纹波电压大大降低了对输出电压的影响,提高了输出电压的精度。

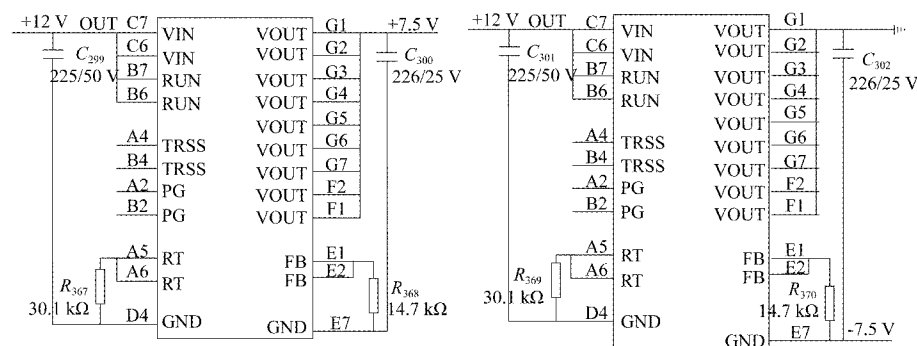


图2 供电电路原理图

2.2 DA转换过程

对于模拟量卡电压输出信号的精度要求是±0.15%,设计过程中尽可能使用高分辨率的DAC,在模拟信号输出的电路中DA的转换过程对于输出电压的精度影响较大^[6],所以在芯片选用过程中,理论上位数越高,精度越高,本文设计中,采用的是LINER公司的单通道电压输出数模转换器型号是LTC2642,LTC2642是16 bit无缓冲的输出电压DAC,为了提高输出精度,在电路设计过程中需要在REF和GND之间有短引线的0.1 μF陶瓷电容器提供高频旁路,一般选用低电感、精度高的一类陶瓷电容器。REF和GND之间的附加4.7 μF提供了低频旁路。

另外对于芯片本身的精度是无法改变的,可以通过改变PCB的设计来改善输出性能,设计PCB时,严格区分模拟地和数字地^[7],分区域布置PCB,采用单点接地的方式,

市电220 V电压通过测试台背板转为12 V向模拟量输出卡供电,由于开关电源相比LDO来说,工作在开关状态,为了减小输入噪声对输出端电压的影响,在输入端接2.2 μF电容,输出端接22 μF电容,防止输出电压击穿输出电容,输出端的电容耐压值应该大于输出端额定电压的2倍。LTM8002输出电压与反馈电阻的关系式:

$$R_{FB} = 97 / (V_{OUT} - 0.97) \quad (1)$$

调节 R_{FB} 使输出电压等于±7.5 V,供电电路原理图如图2所示。

防止信号之间的串扰,尽可能的减小其他物理因素的对输出信号的影响。

2.3 模拟量卡双极性电压输出调理电路

16 bit DAC实现了模拟量卡的数字量到模拟量的转换,DAC输出的电压值为±2.5 V,通过精密、低功耗、四通道的AD824实现对电压信号的调理,经过信号调理电路后输出-0.75~+5.75 V,冗余设计0.75 V^[8]。

信号调理电路具体实现过程为,数字信号经过DAC后输出±2.5 V的电压信号,U1B起到了信号的放大作用,U1B的电压放大倍数公式:

$$a = 3.9K / 3K \quad (2)$$

输出电压为-3.25~+3.25 V,U1C的正端输入偏置电压为2.5 V,根据虚短虚断可以得出 $V_{OUT} = -0.75 \sim +5.75$ V。模拟量卡双极性电压输出信号电路如图3所示。

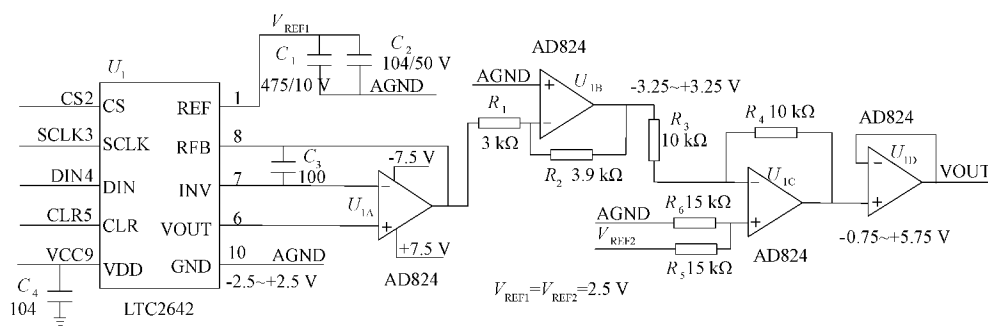


图 3 双极性模拟量信号输出调理电路

2.4 采样保持

模拟量输出卡输出 96^[9] 路模拟信号,在设计中如果每路信号都采用模拟开关进行输出这样会增加设计的复杂度,也会给布置 PCB 电路板带来巨大的工作量,所以本着设计简洁高效的原则,采用 AD 公司的 16 通道的模拟多路复用器 ADG1606,输出端接运放 AD824,在电路中 AD824 作为电压跟随器,使输入电压和输出电压保持一致,放大倍数接近 1,电压跟随器起到隔离和缓冲的作用,运放输出端电阻为 51 Ω ,防止输出电流过大,将每路输出的电流限制在 20 mA 以内,防止烧坏对接设备^[10]。

采样保持电路的设计直接决定了回采精度的大小,如果模拟开关没有完全切换输出时 C96 电容两端电压出现掉电情况,会导致回采电压值存在较大误差,导致回采电压精度远远大于 0.1%。所以采样保持时间应该大于开关切换时间¹¹。放电时间公式:

$$T = RC \quad (3)$$

电容完全充满时间接近无穷大,当 $T = RC$, 电容电压 = 0.63E; $T = 2RC$, 电容电压 = 0.86E; $T = 3RC$, 电容电压 = 0.95E; $T = 4RC$, 电容电压 = 0.98E; $T = 5RC$, 电容电压 = 0.99E。由此可得出,采样保持时间应大于 $5RC$ 。

根据芯片手册 ADG1606 每路切换的时间为 175 ns, 所以开关切换时间公式:

$$t = 175 \times 96 = 16.8 \mu s \quad (4)$$

采样保持电路中 $5RC > 16.8 \mu s$ 。采样保持电路如图 4 所示。

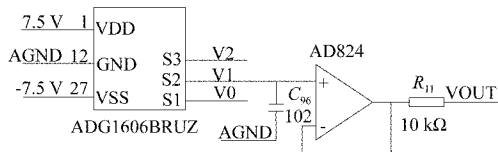


图 4 采样保持电路

2.5 电压信号回采调理电路

秉着输出高精度、高可靠性模拟信号的原则^[12],设计了输出信号回采电路,信号精度要求为 $\pm 0.1\%$ 。回采电路的设计理论相当于电路的闭环自检,不用外接电缆进行测试,节约成本。回采电路的设计是为了验证设备输出信

号的正确性,模拟量输出卡与控制器联合调试时,当被测测试信号出现错误时,可以迅速、高效的找到自己设备的问题。

模拟量输出卡有 96 路自检通道,通过 6 组 16 选 1 高速模拟开关来轮循切换实现自检功能。减少了测试人员的工作量,同时提高了测试设备的自动化程度。数据^[13]回采时,只需要对第 1 路电压信号进行回采标定,标定完成后,需要根据上位机测试软件对其余 95 路电压信号进行自动校准,降低了自检工作的复杂程度,提高了自动化水平。

由图 5 可以看到,HC 的电压信号范围为 $-0.75 \sim +5.75$ V,偏置电压为 2.5 V, U3C 的输出电压为 $-0.75 \sim +5.75$ V, $R_9 = R_{10} = R_{11} = R_{13}$, 根据同相加法电路可以计算得到 U2D 的输出电压为 $0.48 \sim 6.9$ V; $R_{12} = 12$ k Ω , $R_{14} = 24$ k Ω , $R_{12}/R_{14} = 1:2$ 可以计算得到 U3A 的电压为 $0.16 \sim 2.3$ V。

根据模数转换器 AD7667 的芯片手册可知,IN+ 的输入电压范围为 $0 \sim 2.5$ V,输入 IN+ 的电压值在 $0 \sim 2.5$ V 电压的范围内才可以将输入的模拟量转换为数字量,所以在进入模数转换器前需要增加信号调理电路^[14]。AD7667 将输出的数字量信号通过总线进入到 FPGA,通过上位机实时显示回采电压值。于此同时用万用表测量同一通道,记录输出电压值,进行数据标定。模拟量输出卡回采电路如图 5 所示。

3 软件设计

模拟量输出卡采用的是 40 M 的晶振,每到一个新的 clk,电路就会执行新的指令。在模拟量信号输出软件设计过程中,首先,上电执行复位指令,电路恢复成初始状态。等待几个时钟后,信源启动,FPGA 将数字量信号传递给 LTC2642,将数字量信号转化为 96 模拟量信号后信源停止。实现 DA 转换后将 96^[15] 路模拟量信号通过模拟开关切换输出,输出过程如图 6 所示。

输出信号回采的软件设计过程中,模拟量信号边输出边执行回采操作,回采信号经过调理电路将数字量信号发送给 FPGA。通过标定关系式 $y = kx + b$,将数字量转换

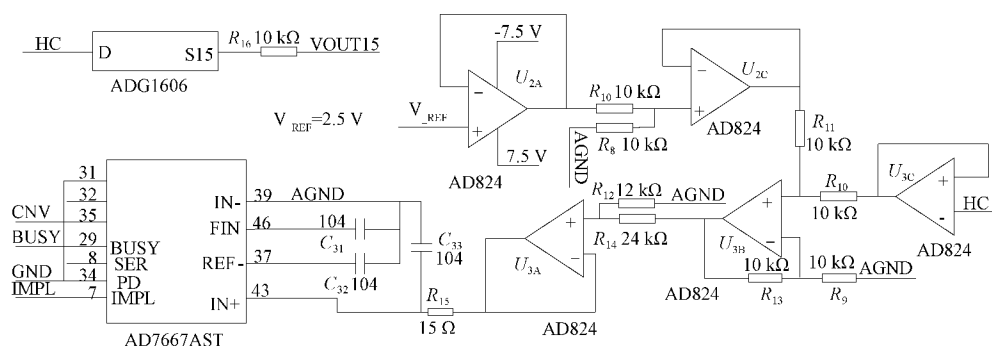


图5 模拟量卡电压信号回采电路

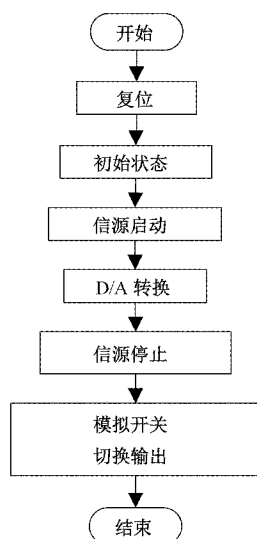


图6 输出流程图

为模拟量输出,在上位机显示回采电压值。其中 y 代表输出的模拟量, x 代表输入的数字量, k 为斜率, b 为截距。回采流程如图7所示。

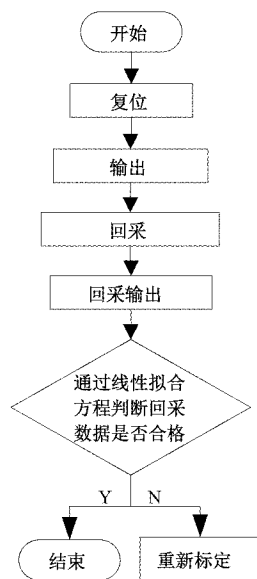


图7 回采流程图

4 测试数据分析

测试过程中将模拟量输出卡插在CPCI-3414AR/2AC机箱上,由上位机下发0000~FFFF数据指令,采用34410A6 1/2位高性能数字万用表测试输出电压。

为了获取高精度的测试数据^[16],模拟量输出卡采用两种方式进行数据标定。第1种标定方式为手动标定,第2种标定方式为自动标定。手动标定是上位机0000~FFFF由每路输出信号输出的电压值进行线性拟合,得出每路信号的 k 、 b 值。标定后测试数据如表1所示。

表1 手动标定后测试数据

上位机配置电压值/V	输出电压值/V	精度/%
-0.75	-0.743	0.10
0	0.007	0.10
1	0.995	0.07
2	1.994	0.09
3	3.006	0.09
4	3.995	0.07
5	5.006	0.09
5.75	5.744	0.09

由表1可得出输出信精度达到设计 $\pm 0.15\%$,测试最高精度0.07%。

第2种方式是上位机下发0000~FFFF配置文件,由万用表测得第1路输出信号电压值,要求精度达到 $\pm 0.15\%$,将其进行线性拟合,其余95路信号以第1路输出信号为标尺进行线性标定。理论上第二种标定方式精度要高于第一种标定方式,自动标定减少了人为操作误差。标定测试数据如表2所示。

由表2可知,经过线性拟合后,采用以第一路数据为标尺自动标定其余95路的数据精度要高于96路手动标定,测试精度中最大提高0.06%,最小提高0.03%。

根据回采测试数据得出:回采数据经过线性拟合后,通过上位机下发配置文件,用万用表测试输出电压值,由测试数据得回采精度达到 $\pm 0.1\%$,达到预期设计回采电压精度,回采标定后测试数据如表3所示。

表 2 自动标定后测试数据

上位机配置电压值/V	输出电压值/V	精度/%
-0.75	-0.746	0.06
0	0.005	0.07
1	0.997	0.04
2	1.998	0.03
3	3.005	0.03
4	3.998	0.03
5	5.004	0.06
5.75	5.747	0.04

表 3 回采标定后测试数据

上位机配置电压值/V	输出电压值/V	精度/%
-0.75	-0.746	0.06
0	0.005	0.07
1	0.997	0.04
2	1.998	0.03
3	3.003	0.04
4	3.995	0.07
5	5.004	0.06
5.75	5.746	0.06

5 结 论

本文设计了一种模拟 0~5 V 电压信号的多通道模拟量输出卡,96 路电压信号输出稳定可靠,输出电压精度达到设计要求的 $\pm 0.15\%$,回采电压信号达到设计要求的 $\pm 0.1\%$ 。测试数据采用自动标定的方式,输出精度至少提高 0.03%,实现了高精度的模拟量信号输出。后期打算选用更为高精度的模拟开关和多路数模转换器提高输出精度。此次设计产品已交付使用,通过与控制器联合测试,满足任务书设定的功能。

参考文献

- [1] 刘勇良,沈三民,李建军,等. 基于 FPGA 的高精度模拟量变换器设计[J]. 仪表技术与传感器,2019(2):31-34,47.
- [2] 郝少帅,杨玉华,王淑琴. 基于 FPGA 的高精度采集系统的研究与实现[J]. 电子测量技术,2020,43(19):154-158.
- [3] 梁孟享,胡聪,盘书宝. 基于 FPGA 的高性能信号源模块设计[J]. 国外电子测量技术,2012,31(4):64-67.
- [4] 张祥,崔永俊,刘坤,等. 基于 FPGA 的数字量变换器测试台研制[J]. 仪表技术与传感器,2018(12):46-49,53.
- [5] 何维然. 一种可配置的模拟量采集模块设计[J]. 国外电子测量技术,2014,33(10):42-45.
- [6] 崔玉江,陈娣,李丹佳,等. 基于 PXI 总线的遥测数字量变换器测试台的研制[J]. 测控技术,2013,32(4):140-142.
- [7] 钱素琴,孙悦. 基于 AD9226 的 FPGA 高速数据采集电路设计[J]. 电子测试,2021(11):5-8,12.
- [8] 李茂林. 多路数据采集传输系统的 FPGA 设计与实现[J]. 计算机时代,2021(4):49-53.
- [9] 陈旭,夏果,马艳,等. 基于 FPGA 的光谱数据采集系统设计[J]. 电子测量技术,2019,42(14):157-162.
- [10] 胡鹏,张志文,马超. 多通道 CAN 总线数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术,2019,38(2):61-65.
- [11] 陈健伟,陈鸿,王晋祺,等. 高可靠性多通道模拟信号采集存储系统[J]. 仪表技术与传感器,2019(3):114-118.
- [12] 宋锡文,董业鹏,杨世飞. 基于 FPGA 的振动信号处理参数寻优试验研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(2):101-108.
- [13] 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.
- [14] 杨烨,闫丽. 基于 FPGA 的数据采集系统[J]. 工业仪表与自动化装置,2019(5):85-86,109.
- [15] 高国旺,侯大森,余大伟,等. 基于 FPGA 的多参数测量系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2020,39(4):110-114.
- [16] 徐健,林皓琨,肖新帅. 基于 N 型热电偶的智能化多通道测温系统[J]. 电子测量技术,2019,42(8):127-131.

作者简介

胡晓捷,硕士研究生,研究方向为电路与系统。

E-mail:15735044434@163.com

焦新泉,教授,研究生导师,研究方向为微纳米器件及测试技术。

E-mail:jiaoxinquan@nuc.edu.cn

贾兴中,工程师,硕士,研究方向为电路与系统。

E-mail:18636687318@163.com