

高精密电压源设计与实现方法

余玉成,张春熹,李慧鹏

(北京航空航天大学 仪器科学与光学工程学院,北京 100191)

摘 要:针对标准电压源的高失调性、低稳定性等缺陷,提出了一种高精度精密电压源的实现方案。通过标准电压源的生成过程分析基准电压源对数模转换器的要求,进而选择 20 位高精度数模转换器 AD5791。重点阐述了其电路的设计方案,并结合 AD5791 的硬件特性和软件设置克服了以往数模转换器作为基准源的高失调现象。对实验数据进行测试表明,该方案具有线性度高、稳定性好的优点,能输出 0~10 V 连续电压且其输出精度可达 0.02 mV,线性度高达 99.996%,能够满足高精密电压源的设计要求。

关键词:精密电压源;高精度;AD5791;基准源;反馈

中图分类号:TN156;TP216

文献标识码:A

Design and Implementation of High Precision Voltage Source

SHE Yucheng, ZHANG Chunxi, LI Huipeng

(School of Instrument Science and Optical Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the high imbalance, low stability of the standard voltage source, the implement scheme of a high precision voltage source was put forward in this paper. The 20 bit high precision analog-to-digital converter AD5791 was selected through analyzing the requirement of the digital-to-analog converter for the generation process of the standard voltage source reference voltage source. The design scheme of the circuit was presented and the high imbalance phenomenon of the past D/A converters as a reference source was overcome by combining the AD5791 hardware features and software settings. The test of the experimental data showed that the proposed scheme had advantages of high linearity and good stability. The 0~10 V continuous voltage can be output with the precision of 0.02 mV, and the linearity is up to 99.996%. It can satisfy the design requirements of high precision voltage source.

Key words: precision voltage source; high precision; AD5791; reference source; feedback

0 引言

数模转换器(DAC)可提供可控的高精密基准电压,其广泛应用于精密测量、精细加工、生物工程、医疗系统及航空航天等纳米级定位技术中。随着半导体处理及片内校准技术的发展,关于高精密集成电路 DAC 的定义也在不断变化。近年来,16 位精度 DAC 已日益在精密医学、测试和计量,仪器仪表应用中越来越广泛,随着时间的推移,对 DAC 的精度要求提高,仪器、仪表及精密加工等领域对 DAC 的精度和分辨率要求也越来越高^[1]。目前,我国使用的 DAC 已达 20 位,但其线性度却只达 20×10^{-6} 。随着技术的发展,精度将不断提高,参数要求更高,此时噪声干扰问题、温度漂移问题、电压失调

问题及线性稳定度问题^[2]均严重影响 DAC 的精度。目前,大部分 DAC 达不到设计要求。高精度数模转换器 AD5791(20 位的高分辨率和 1×10^{-6} 的线性度)可提供高精度的直流基准电压,从而提高系统的输出线性度。本文采用 20 位高精度数模转换器 AD5791 来设计一款高精度基准电压源,与其他设计方案相比^[3-5],其整体性能有提高,具有精度高,体积小,成本低等特点,使以前不具经济可行性的仪器仪表应用成为可能。

1 标准基准源的生成及分析

高精度的标准基准源(见图 1)是一个自动反馈控制系统,首先直流电压基准产生一个可调基准 V_{REF} 信号,经电压和功率放大(放大倍数分别为 A_1

收稿日期:2016-12-27

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2013YQ040877)

作者简介:余玉成(1992-),男,湖南永州人,硕士生,主要从事精密科学仪器、高精度压电陶瓷微位移闭环系统的驱动技术的研究。通信作者:张春熹(1965-),男,博士生导师,主要从事光纤陀螺及导航系统、光电检测与信号处理的研究。

和 A_2) 接到输出端上,输出端再经取样电路衰减 N 倍和误差放大电路放大 F 倍反馈到直流基准上。通过整个系统的反馈调节最终将输出信号稳定在设定值上,其输出电压 V_o 为标准基准源输出^[6]。

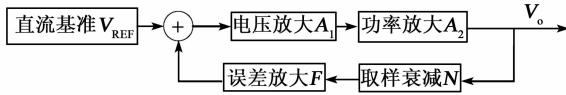


图 1 标准基准源

由图 1 可知,标准基准源 V_o 为

$$V_o = (V_{REF} - FN V_o) A_1 A_2 \quad (1)$$

通过推导有

$$V_o = \frac{A_1 A_2 V_{REF}}{1 + A_1 A_2 FN} = \frac{V_{REF}}{\frac{1}{A_1 A_2} + FN} \quad (2)$$

在实际设计应用中, A_1 和 A_2 都很大,因此,可认为 $\frac{1}{A_1 A_2} \rightarrow 0$ ^[7],由此可得标准基准源的输出 V_o 为

$$V_o \approx \frac{V_{REF}}{KN} \quad (3)$$

式中 K 为放大倍数。根据误差理论可得

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{\Delta V_{REF}}{V_{REF}} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta N}{N} \quad (4)$$

其中取样电路衰减的误差 ΔN 和误差放大的误差 ΔF 可通过选配电阻来调节,因此, V_o 的精度及线性度主要受基准电压 V_{REF} 的影响。而在设计能产生这种高精度直流基准电压的 DAC 需充分考虑稳定性、分辨率、线性度及温度漂移等因素,经过充分调研本文最终选用了 AD 公司生产的高分辨率、高精度数模转换器 AD5791。

2 精密电压源电路设计与实现

2.1 AD5791 简介

系统采用 20 位高精度数模转换器 AD5791。AD5791 美国 AD 公司生产的一款高精度、单通道、串行输入、快速建立的 20 位无缓冲电压输出数模转换器,其最高供电电压可高达 33 V,同时,DAC 采用了最新电阻薄膜技术,内部由 2 个相互匹配的 DAC 部分组成,能及时通过片内校准来提高 DAC 的输出精度,保证工作单调性。该款 DAC 能实现 $1 \mu V$ 的高精度,微分非线性 (DNL) 最大值为 $\pm 1 \text{ LSB}$ ^[8]。其延时不超过 100 ns,能满足波形的生成和快速控制应用,同时 DAC 内部有自带的上电复位电路,上电后可以保证 DAC 输出为 0。此状态一直到通过 3 线 SDIN、SCLK、SYNC 串行接口以 24 位数据格式对 AD5791 进行写操作为止。

2.2 硬件设计

设计高精度电压源首先需要将 AD5791 上电至 0。AD5791 内部有自带的上电复位电路,上电后可保证 DAC 输出为 0,此时所有的寄存器复位至初始值,上电时 DAC 处于三态模式,DAC 输出一个约为 $6 \text{ k}\Omega$ 电阻箝位至 AGND,直到通过控制寄存器将其设置为其他状态。上电后需通过三线串行接口对控制寄存器进行 24 位数据格式的写操作,使 DAC-TRI 位清零以退出 DAC 三态模式,同时 OPGND 位清零以消除输出箝位,此时 AD5791 处于正常工作模式。同时需要对 AD5791 内部的输出放大器进行配置,输出放大器有多种配置方式,具体取决于所施加的基准电源和所需的输出电压范围。本文选用可提高动态特性的单位增益配置,输出范围为 $V_{REFN} \sim V_{REFP}$ (其中, V_{REFP} 为输入正基准电压; V_{REFN} 为输入负基准电压),当工作在这种工作模式下,需要将 AD5791 的控制寄存器中的 RBUF 位 (输出放大器配置位) 置为高电平。为了提高动态特性,可以在放大器反馈路径中增加一个电容,同时为了有效地消除输入偏置电流失调影响,可以在单位增益放大器的反馈路径中加入一个约为 $3.4 \text{ k}\Omega$ 的电阻。

由于 AD5791 正负基准端都需要放置单位增益放大器,同时为减少失调电压和输入偏置电流可能对精密度的影响,保证维持直流精度,故选用精密运算放大器 AD8676 和 AD8675 用作基准缓冲和输出缓冲。而绝对精度取决于外置 10 V 基准电压的选择,ADR4550 是高精度 5 V 基准电压源,其失调电压仅有 0.02% ,为了获得 10 V 基准电压,可将 ADR4550 输出的 $+5 \text{ V}$ 基准电压配合 AD8676 运放放大 2 倍至 $+10 \text{ V}$ 。此增益电路中 RJ5 和 RJ6 为精度 0.1% 的精密金属薄片电阻。 R_{22} 和 C_{78} 构成截止频率约为 10 Hz 的低通滤波器,该滤波器主要用于衰减基准电压噪声。

图 2 为精密电压源电路原理图。AD5791 采用单电源 3.3 V 和双电源正负 15 V 同时供电方式。为确保 1×10^{-6} 线性度,AD5791 内部的精密架构要求外部必须使用高性能外置放大器来缓冲内部 $3.4 \text{ k}\Omega$ 电阻的基准源。本文选用 AD8676 和 AD8675 作为基准电压输入缓冲器;同时 AD5791 需要一个输出缓冲来驱动负载,以减轻 $3.4 \text{ k}\Omega$ 电阻输出阻抗的负担,并考虑到输入偏置电流可能对精密度的影响和输出失调电压的大小,所以用 AD8675 作为输出缓冲器。AD5791 的 SYNC、

SDIN 和 SCLK 分别与 DSP 的 SPI 接口连接,由 DSP 的 SPI 接口向 AD5791 发送串行数据,00000H 对应 0,FFFFFFH 对应 10 V。而 LDAC 通过 DSP

的一个 GPIO 接口控制 DAC 同步或异步更新方式。这样 AD5791 就可完成 0~10.000 000 V 的高精度基准电压输出。

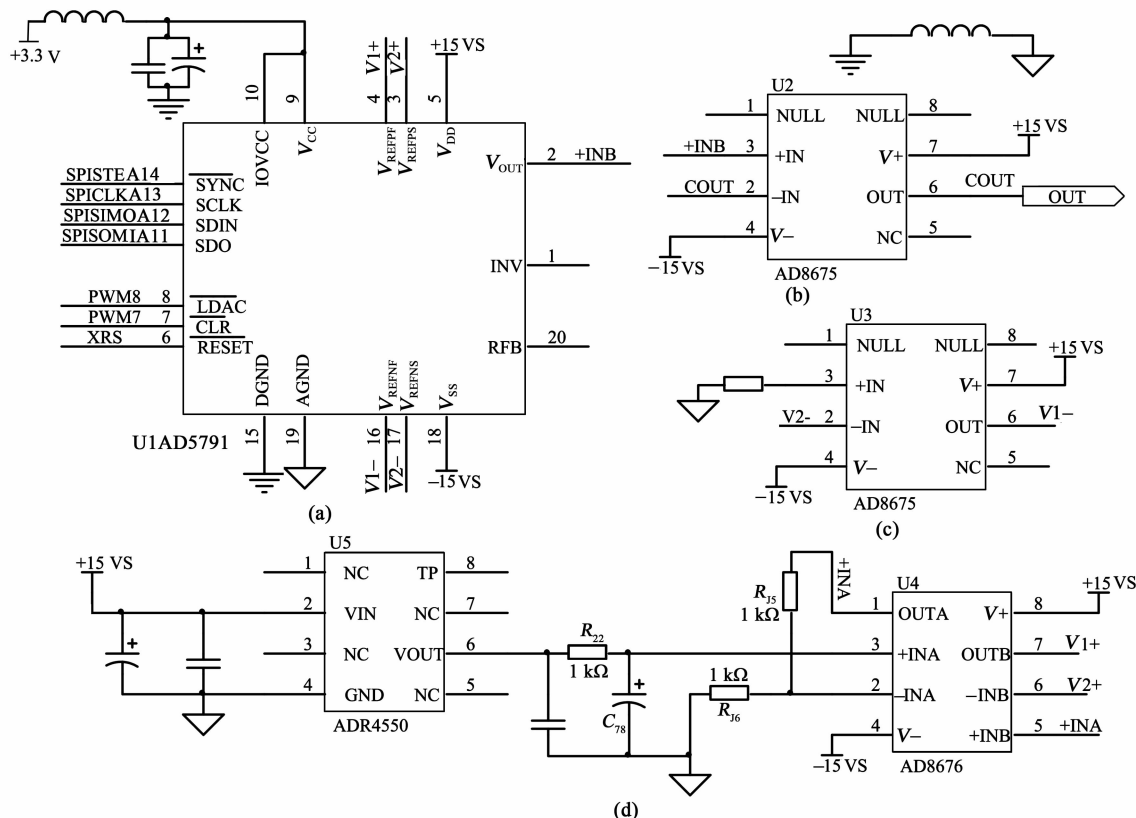


图2 精密电压源电路原理图

2.3 软件设计

为了确保 AD5791 工作在正常工作模式,需要通过三线串行接口对控制寄存器写入 24 位数据格式对控制寄存器进行设置。使 DACTRI 位清零退出 DAC 三态模式,OPGND 位清零以消除输出箝位,此时 AD5791 即处于正常工作模式。同时,控制寄存器的 LIN COMP 位置 0000 默认输入范围 10 V,SDODIS 位置 0 使能 SDO 引脚,BIN/2SC 位置 0 默认 DAC 寄存器正常编码。

输入移位寄存器的 DB22、DB21、DB20 配置为 001,即写入 DAC 寄存器方式,后 20 位为写入的所需电压数据。DAC 的理想传递函数为

$$V_{OUT} = \frac{(V_{REFP} - V_{REFN}) \times D}{2^{20}} + V_{REFN} \quad (5)$$

式中 D 为所需的 20 位电压数据。其软件系统流程图如图 3 所示。通过将所需的实际电压换算成为十六进制,并通过三线串行来完成写入 DAC 的 20 位

代码对 AD5791 的送数,最终生成我们所需要的电压基准源。

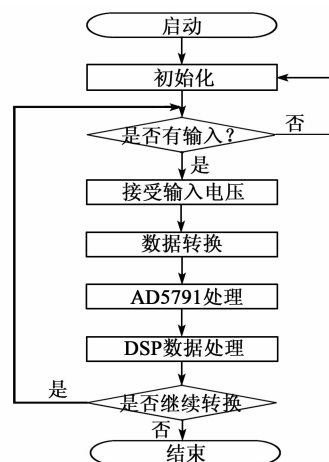


图3 软件系统流程图

3 实验结果分析

3.1 DAC 分辨率实验

在实验过程中将 AD5791 配置为 0~10 V 的输

出范围,因此,在理论上每一位的输出精度应为 $\frac{10}{2^{20}}=0.009\ 8(\text{mV})$ 。在本次实验中选用六位半的台式万用表进行实验测试,将万用表量程档位调至 10 V 档,此时万用表的测量精度为 0.000 1 mV,即万用表的测量精度低于 DAC 的输出精度,能完全满足实验所需精度要求。

DAC 的电压输出量由 AD5791 的 20 位输入数据值进行设定,可输入的范围为 0~0xFFFFF,对应的输出范围为 0~10 V。在本实验测试中,输入测试值为 5 V,即 0x7FFFF,测试 1 000 个数据。同时用 RS232 接口串口通信线将万用表与 PC 进行上位机连通,使万用表测试的数据能同步到上位机上。测试数据如图 4 所示。

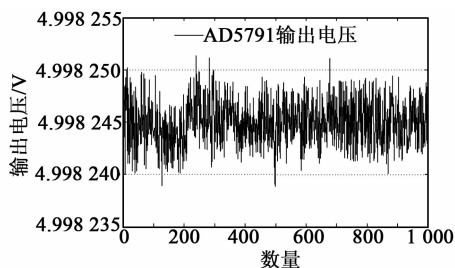


图4 实验误差结果图

由图 4 可看出,D/A 的电压输出较稳定,电压峰-峰值约为 0.015 6 mV,通过图 4 观察可得,其峰-峰值分辨率约为 19.2 位。因此,该 DAC 分辨率是完全满足系统的高分辨率要求。

3.2 D/A 线性度实验

对输出范围 0~10 V 的 AD5791 芯片进行软件设置,在 0x00000~0xFFFFF 范围内每隔 10 ms 依次递增更新输入数值,同时用六位半的万用表进行电压测量,并对测量后的结果用 Matlab 进行直线拟合,最终拟合图如图 5 所示。由图可看出,实际输出和拟合数据图基本一致,通过数据计算其线性度高达 99.996%,DAC 具有很好的线性度。

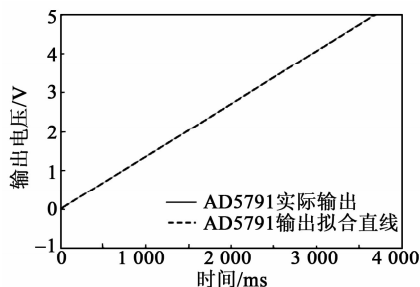


图5 D/A 线性度实验图

4 结束语

本文通过标准基准源的生成阐述了其直流电压基准源对于精度的作用,并利用了高分辨率数模 AD5791 特性设计了一种高精度、高线性度以及高可靠性的电压源,克服了传统数模转换器偏置电压中的高失调现象,提高了其作为电压基准源的精度。最后通过实验校验了基准源的准确性,可达到设计目标的精度要求。

参考文献:

- [1] 杨雪峰,李威,王禹桥. 压电陶瓷驱动电源的研究现状及进展[J]. 仪表技术与传感器,2008,24(11): 109-111.
YANG Xuefeng, LI Wei, WANG Yuqiao. Study and progress of piezoelectric ceramic drive power[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008, 24(11): 109-111.
- [2] 付志博. 高速高精度 DAC 设计研究[D]. 北京:北方工业大学,2013.
- [3] 乐千杞,徐静. 高精程控电压源的设计与实现[J]. 现代电子技术,2008,12(1):25-26.
LE Qianqi, XU Jing. Design and implementation of high precision programmable voltage source[J]. Modern Electronics Technology, 2008, 12(1): 25-26.
- [4] 许艳惠. 一种智能化高精度数控直流电源的设计[J]. 微计算机信息,2007,23(32):136-138.
XU Yanhui. Design of an intelligent high precision NC DC power supply [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(32):136-138.
- [5] 吴蓉,邹伟. 一种输出可调的高性能带隙基准电压源的设计[J]. 兰州交通大学学报,2011,12(6):59-63.
WU Rong, ZOU Wei. Design of a high output bandgap voltage source with output adjustable[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2011, 12(6):59-63.
- [6] 许宇翔,马陈燕,雷能玮. 基于 spwm 技术的电机驱动电源设计[J]. 煤矿机械,2014,35(4):25-27.
XU Yuxiang, MA Chenyan, LEI Nengwei. Design of motor drive power based on spwm technology[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(4):25-27.
- [7] 汤鹏. 基于 FPGA 的高精密程控电压源的研究与设计[D]. 广州:广东工业大学,2012.
- [8] ADI 公司. 20 bit 线性低噪声精密单极性+10 V 直流电压源[J]. 电子技术应用,2012,21(3):34-36.
ADICompany. 20bit linear low noise precision unipolar +10 V DC voltage source[J]. Electronic Technology Applications, 2012, 21(3):34-36.