

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210518

# 高准确度交流电压标准源电路设计与实现

贾冬宇 冯荣尉 温星曦 李爽玉  
(北京东方计量测试研究所 北京 100086)

**摘要:** 为满足交流电压参数校准验证的需求,本文设计了一种高准确度交流电压标准源电路。基于高准确度、高稳定性要求整体电路采用闭环反馈结构,使用 AD9850 芯片生成交流信号,通过直流参考电压对正弦波进行调幅,微控制器使用 AVR 芯片。同时信号模拟电路与数字控制电路实现电气隔离,通过硬件选型、软件补偿等措施提高准确度。设计输出量程范围 1~10 V,输出频带 40 Hz~100 kHz。交流电压标准源在典型频率点上多次测试,结果表明在频带 40 Hz~50 kHz 中输出满量程电压的允许误差小于 0.006%;在 100 kHz 处满量程电压的允许误差保持在 0.025%以内,电路具有准确度高、稳定性好等性能优点。

**关键词:** 标准源;直接数字频率合成;电路设计;信号调理

**中图分类号:** TN98   **文献标识码:** A   **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Design and implementation of high precision AC voltage standard source circuit

Jia Dongyu Feng Rongwei Wen Xingxi Li Shuangyu  
(Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100086, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of calibration and verification of AC voltage parameters, a high precision AC voltage standard source circuit is designed in this paper. Based on the requirements of high precision and high stability, the overall circuit adopts a closed-loop feedback structure, uses AD9850 chip to generate AC signal, and then modulates the amplitude of the sine wave through the DC reference voltage. The microcontroller of the circuit uses AVR chip. At the same time, the signal analog circuit and the digital control circuit are electrically isolated, and the accuracy is improved through hardware selection, software compensation and other measures. The output range of the designed circuit is 1~10 V, and the output frequency band is 40 Hz~100 kHz. The AC voltage standard source is repeatedly measured at typical frequency points. The results show that the permissible error of the output full-scale voltage is less than 0.006% in 40 Hz~50 kHz, the permissible error of the full-scale voltage at 100 kHz is kept within 0.025%. The circuit has the advantages of high precision and good stability.

**Keywords:** standard sources; direct digital synthesis; circuit design; signal conditioning

## 0 引言

电学计量参数的量值传递和溯源工作与国防、科研、社会民生等各个行业都息息相关,对于各行各业都具有重要的保障意义<sup>[1]</sup>。交流电压标准源产品在国家计量系统的各级计量站中被大量使用,日常工作中常用标准源产生交流标准电压,承担了相当多的计量检定任务。

经市场调研可知,以美国福禄克(Fluke)公司为首的国外标准源发展较早,型号稳定,升级换代速度慢,并对我国进行保密措施,在国内的标准源市场占有绝对优势。我国在该方面起步较晚,目前与国外高端产品存在明显差距,因

此开展高准确度交流电压标准源的研制具有重要的应用价值,目前也有很多高校与企业致力于标准源的研发。

2013年,陈波<sup>[2]</sup>通过对噪声进行抑制提升输出准确度,并设计恒温控制方案来减小元器件的温漂,最后通过不同算法完成反馈控制,实现了±15 V的电压输出,带宽为0~200 Hz,准确度优于±0.001%。2016年,薛巨峰等<sup>[3]</sup>考虑到直接数字频率合成(direct digital frequency synthesis, DDS)技术的杂散影响,采用锁相环(phase locked loop, PLL)技术产生正弦波,设计出频率、相位、幅度可调的信号源,输出带宽40~65 Hz,输出失真度小于0.03%,对低频信号的校准起到推动作用。2019年,段亦

收稿日期:2022-06-29

韩<sup>[4]</sup>通过控制理论指出反馈回路与直流参考电压的性质基本决定了整个标准源的指标,并基于FPGA合成DDS设计了大量程、宽频、高分辨率的交流电压标准源,年误差最优为 $\pm 0.03\%$ ,利用双开关通道脉宽调制技术,实现了输出电压分辨率的提升。

除了学术研究,近几年国内也有许多公司推出了商品级多功能标准源产品,如:山东潍坊华光高科电子有限公司、长沙天恒测控技术有限公司、上海浩顺科技有限公司等。其中长沙天恒研制的TD1880标准源在大部分量程指标上达到对标Fluke 5520A的水平,处于国内较高水平。我所针对国产化多功能标准源的需求,先后完成电学五参数标准源关键技术研究 and 多功能校准信号发生器的研制工作,本文设计了高准确度、宽频的交流电压标准源基本量程电路,通过测试验证表明电路输出符合预期指标,为后续研制高准确度大量程交流电压标准源打下基础。

## 1 电路总体方案

对交流电压标准源的总体方案进行设计,其结构框图如图1所示,整个电路的组成包括直流参考模块、正弦波发生模块、数字控制模块、增益调理模块、交直流转换模块5个部分组成。

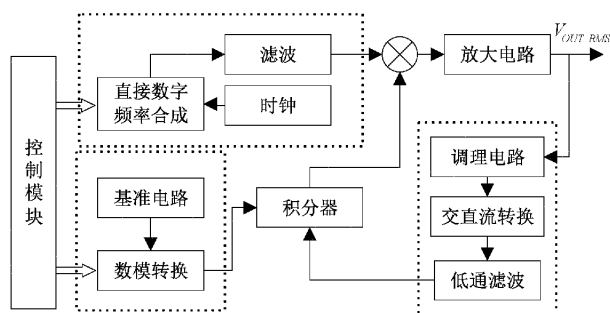


图1 电压标准源总体方案框图

电路整体呈闭环反馈控制结构,目的是让电路达到稳态后可以持续输出高稳定性交流电压,减小元器件中噪声等不稳定因素的影响。

首先,直流参考模块由基准芯片电路和数模转换器(digital analog converter, DAC)组成,该模块利用电压基准芯片为DAC提供基准驱动电压,再由控制模块给定所需参考信号的数字值,转换为稳定可调的直流电压,作为给定信号输出到积分器中。DDS通过外部时钟以及控制芯片发出的频率字生成稳定的频率、相位可调的正弦波,通过滤波消除部分杂散后进入增益调理模块。增益调理模块主要功能为差动积分和对信号放大处理,积分器分别接收来自参考模块和交直流电压转换模块输出的直流电压,进行差值积分,稳定后将差值信号反馈到乘法器,调节正弦波的幅度增益,再经滤波和放大后实现闭环控制,使得输出正弦波具有较高的短期稳定性。交直流转换模块作为反馈的核心,将完成输出交流转变为直流的任务。本文的电压量程为

1~10 V,采用DDS输出较小电压值正弦波,再由放大电路进行进一步的放大,这样可以保证在信号较小时进行偏差控制,可提高输出准确度。最后通过上位机软件或虚拟仪器进行数据的处理和显示。

## 2 硬件单元设计

### 2.1 正弦波发生模块

正弦波电压的产生作为标准源的基础和核心,是决定标准源输出交流电压频率准确度、失真度和稳定性高低的重要因素之一。为实现该目标,本文采用DDS芯片AD9850作为正弦波发生模块的核心<sup>[5]</sup>。

AD9850芯片输出频率 $f_o$ 、参考时钟 $f_c$ 和频率控制字 $K$ 的关系如下:

$$f_o = \frac{Kf_c}{2^N} \quad (1)$$

AD9850有40位控制字,32位用于频率控制,5位用于相位控制,1位用于电源休眠控制,2位用于配置工作模式。40位控制字可通过并行或串行方式输入到AD9850内部寄存器。图2为AD9850生成正弦波电路,电路中控制芯片I/O端口数量充裕,控制信号采用并行输入,时钟采用50 MHz晶振输入,有源晶振信号稳定,而且在PCB上连接简单,不需要复杂的配置电路。

AD9850中12引脚的外部连接电阻 $R_{SET}$ 决定了输出电流 $I_{OUT}$ 的大小,输出关系为:

$$I_{OUT} = 32(1.248/R_{SET}) \quad (2)$$

当外部连接电阻阻值为3.9 k $\Omega$ 时,输出电流峰峰值为10.24 mA,由21引脚(内部DAC模拟电流输出端口)输出,经后续采样电阻获得交流电压。由于精准调整输出电压幅值的是后续直流参考电压,因此在使用外部连接电阻 $R_{SET}$ 时,输出端口不需要精准输出10 mA电流值,选用普通贴片电阻即可。

针对DDS输出特点以及具体需求进行滤波器设计<sup>[6]</sup>:

1) DDS生成杂散的位置均位于时钟频率整数倍的附近( $nf_o \pm f_c$ ),所需滤波器的过渡区间可以较宽,选择DDS时钟频率越高,过渡区间可以越宽,这样可以在同样截止频率下可以选择低阶的滤波器,降低滤波电路的复杂度。

2) 当选取截止频率过小的时候,会出现基频被一同衰减的情况,因此滤波器通带不能过窄,以本设计为例,滤波器截止频率可以在400 kHz~1 MHz的范围内进行选择。

3) DDS芯片直接生成的正弦波在此滤波时无需放大,可选择无源滤波器。

4) 由于滤波器前端输入为电流输入,应在滤波器中增加采样电阻,以达到获得电压的效果。

考虑到上述4点原因,设计了含采样电阻的五阶LC无源滤波器,如图3所示。

经仿真表明该LC滤波器在输入峰峰值10 mA的交流电流后输出频率相同、峰峰值1 V的交流电压,采样电阻为

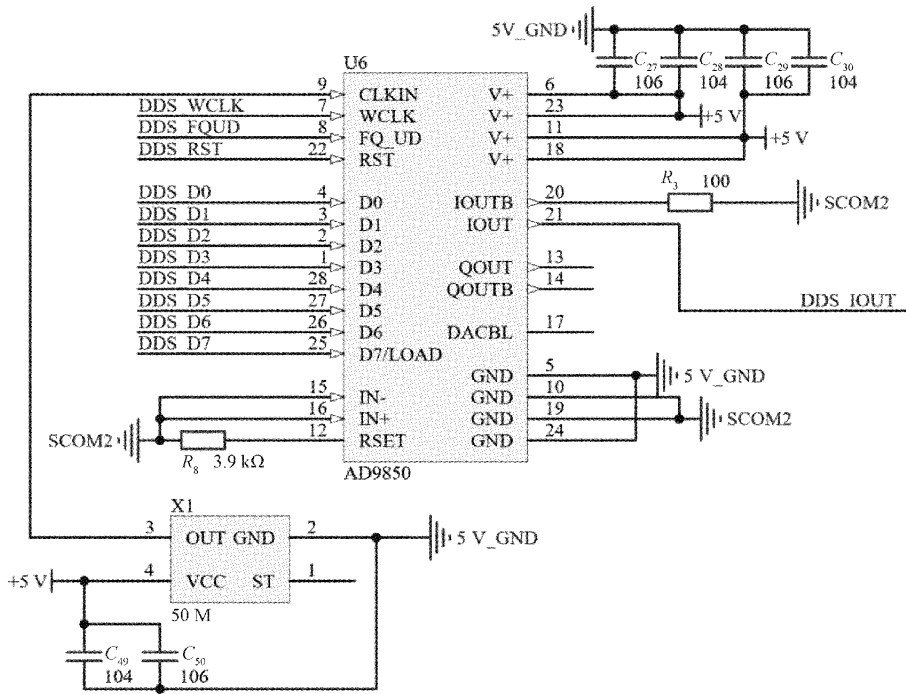


图 2 AD9850 连接电路

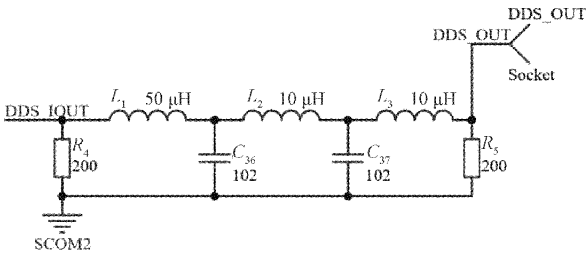


图 3 正弦波输出通过的 LC 低通滤波电路

100 Ω, 滤波输出增益为 40 dB (Gain=100), 截止频率为 800 kHz, 输入电流转换为输出电压的跨阻效果理想, 符合模块对滤波电路的要求。

### 2.2 交直流转换模块

本文设计交流电压标准源电路最终输出 1~10 V, 由于反馈回路中运算放大器供电电源轨至轨范围会对交流电压幅值产生限制, 产生削顶失真现象, 需要对信号进行简单的前端处理: 前级输入设置增益为 0.4 倍的反向放大器。在运算放大器反馈回路中并联一个电容, 作用是防止输出振荡、抑制高频噪声, 容值一般在 pF 级; 反向放大后串联 RC 高通滤波以隔离直流偏置电压。经调理后输入交直流转换电路的信号就变为电压有效值为 0.4~4 V 的正弦波。

目前主流的交直流电压转换方式有: 模拟电路法、热电阻转换法和数字采样法<sup>[7-8]</sup>。其中模拟电路法是通过模拟电路或直流转换芯片将输出正弦信号转换为有效值或平均值直流电压, 该方案实现电路多种多样, 可通过不同的理论公式进行电路的搭建<sup>[9]</sup>, 输出效果取决于元器件实际

参数指标, 通过调试、电路补偿、修正校准等手段可获得较高的转换精度, 在交流电压标准源的产品设计中应用较为广泛。因此本文采用模拟电路法中的精密全波整流电路来完成交直流转换的功能, 精密全波整流电路如图 4 所示<sup>[10]</sup>。

根据先前研究, 对电路中主要元器件进行选型<sup>[11]</sup>: 电阻选用高稳定性金属箔电阻; 二极管采用 BAV99; 运算放大器选择低噪声、高速运放。经过电阻阻值匹配后, 该电路输出为:

$$u_o = |u_i| \quad (3)$$

因此精密全波整流电路也称为绝对值电路, 输入正弦电压信号时输出脉动直流电压, 再经后续低通滤波处理得到稳定直流电压信号, 交直流模块整体电路框图如图 5 所示。

经计算, 当有效值  $X$  的正弦波进入全波整流电路并进行低通滤波后, 得到直流信号的电压为  $2\sqrt{2}X/\pi$ 。因此标准源输出值  $V_{OUT\_RMS}$  在进入交直流转换模块后, 在反馈端输出得到:

$$V_{ACDC\_OUT} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times 0.4V_{OUT\_RMS} = \frac{4\sqrt{2}}{5\pi}V_{OUT\_RMS} \quad (4)$$

### 2.3 直流参考模块

参考电压是决定标准源输出准确度的关键之一, 将基准芯片输出作为 DAC 的基准驱动电压, 两者结合后由 DAC 生成可调基准电压。本文考虑分辨率、线性度、稳定性、温度漂移等因素选用 ADI 公司的 AD5791 芯片。AD5791 是一款单通道、20 位的 DAC, 双极性电源最高

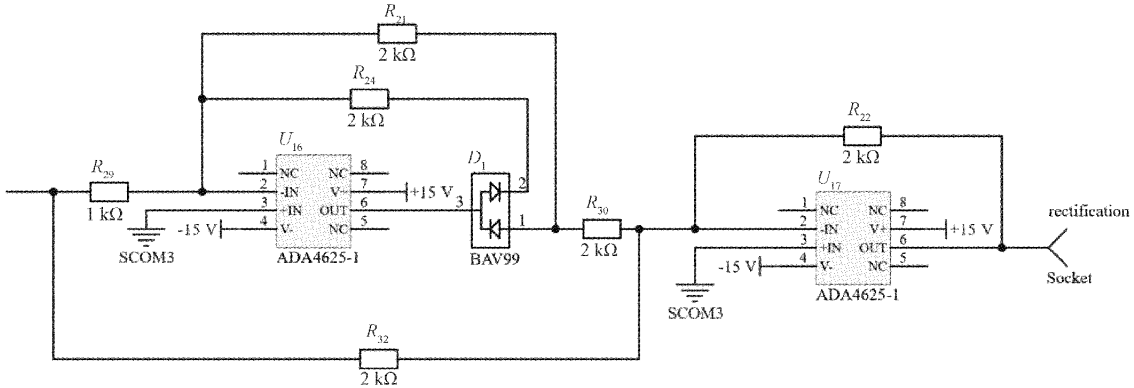


图4 精密全波整流电路

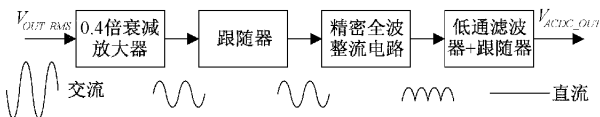


图5 交直流转换模块框图

33 V 供电, 兼容多种接口协议, 相对精度最大值为  $\pm 1$  LSB。

式(5)是 AD5791 的输出传递函数, 其中  $D$  为写入

DAC 的 20 位数据代码。AD5791 单位增益配置电路输出的范围从负基准驱动电压输入  $V_{REFN}$  至正基准驱动电压输入  $V_{REFP}$ 。

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

设计中该部分电路所需正基准驱动电压为 +5 V、负驱动电压为 0, 采用 MAX6350 基准芯片产生 +5 V 电压, 电路如图 6 所示。

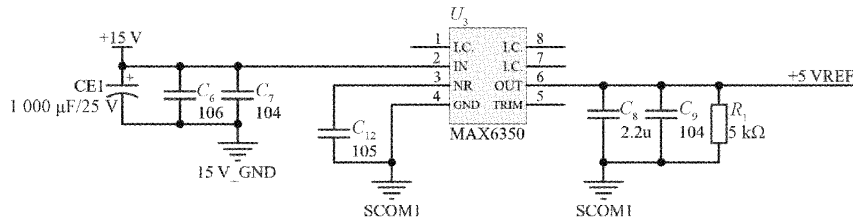


图6 正基准驱动电路

### 2.4 增益调理模块

增益调理模块的作用是将输出信号进行实时的幅值调整, 输出所需幅值的正弦信号。由直流参考模块和交直

流转换模块输出的直流电压分别进入差动积分器的同向、反向输入端, 待稳定后输出电压差值信号  $V_{ERROR}$ , 如图 7 所示。

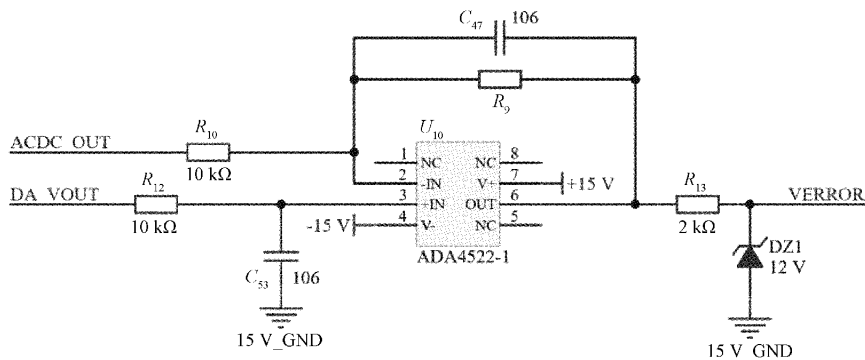


图7 差动积分电路

为了防止低频信号增益过大, 采用在反馈回路上并联一个高值电阻加以限制; 在输出端的齐纳二极管起到过压保护的作用, 当积分器输出值越过限定值时, 齐纳二极管的反向导通电压将钳位保护后续电路不因过压而损坏。需要

注意的是在反馈回路和运算放大器同相端的电容过大会导致输出交流电压上升时间过慢, 而容值过小时会导致输出电压无法稳定产生振荡, 因此具体容值需要在调试中确定, 在本电路中使用容值为  $4.7 \mu\text{F}$  的电容器时测试效果最佳。

差值信号与 DDS 输出相乘之后得到调幅后的信号,乘法器采用 AD633 模拟乘法器芯片,其芯片内部传递函数  $V_o$  为:

$$V_o = \frac{(V_{in1+} - V_{in1-})(V_{in2+} - V_{in2-})}{10 V} + V_{in3} \quad (6)$$

其中,  $V_{in1+}$  和  $V_{in1-}$  为第一路信号的同向、反向输入电压;  $V_{in2+}$  和  $V_{in2-}$  为第二路信号的同向、反向输入电压;  $V_{in3}$  为偏置输入电压。在使用 AD633 时将正弦电压输入  $V_{in1+}$ , 电压差值信号  $V_{ERROR}$  输入  $V_{in2+}$ , 其余端口接地, 这样在输出端可以得到经调幅后的正弦信号。通过传递函数可知, 芯片自动进行了除法, 为保证输出量程的正确无误, 需要进行 10 倍同相放大, 其中选择高稳定性的反向输入电阻和反馈电阻, 乘法电路如图 8 所示。

DDS 的输出电压经乘法器后, 还需进行放大处理, 由于 AD5791 输出电压不能超过电压基准值 +5 V, 对输出有幅度限制, 因此不能将放大倍数设置的过小, 后续选用 3 倍同相放大器, 其好处是: 放大倍数略大时可以采用调小

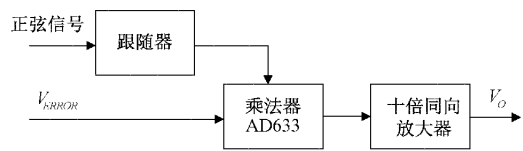


图 8 乘法电路框图

DAC 输出电压来加以平衡, 便于后续对输出电压值的调试。

### 2.5 数字控制模块及隔离电路

本文采用 ATmega 128 芯片作为主控芯片, ATmega 128 内部有 32 个 8 位通用工作寄存器, 并且内置硬件乘法器, 53 个通用 I/O 口, 各引脚均可以独立选择输入输出方向, 125 kB 的在系统可编程 Flash, 4 kB 的内部 SRAM, 4 kB 的 EEPROM, 多达 64 kB 的外部存储器空间, 可通过 SPI 串行外设接口协议实现系统内编程, 并且具有廉价、容易购买等特点。

控制电路如图 9 所示, 电路连接包括外部电源、I/O 端口、晶振输入频率、JTAG 接口等。

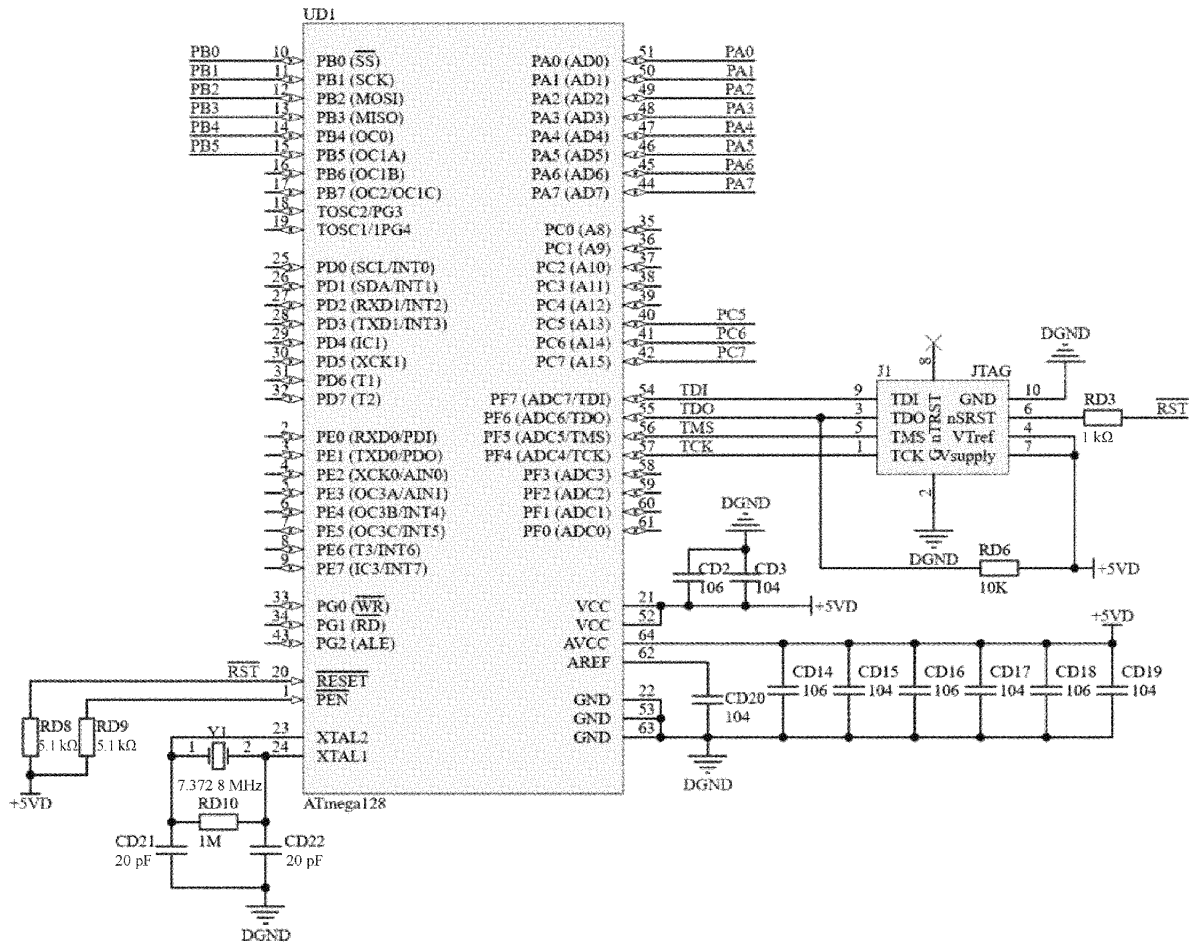


图 9 ATmega128 控制芯片电路

主控芯片及其外围电路属于数字电路部分, 在设计电路 PCB 时, 应注意模拟电路与数字电路的隔离问题。数字

电路中具有系统时钟、高速总线等大功率数字信号, 是一个较大的干扰源, 应合理分区布置模拟器件与数字器件,

减小相互之间的信号耦合与噪声干扰。除了布局位置不能相互交叉之外,两部分的共用信号在传输时还需采用隔离芯片将数字信号与模拟信号完全隔离。电路中元器件主要分为3类:模拟器件(运算放大器、乘法器);数字器件(主控芯片、DDS芯片);模拟、数字信号均包含的器件(DAC、隔离芯片)。

综合考虑本设计采用磁耦隔离芯片,使用4/0通道的单向四路数字隔离器ADUM1400,由ATmega128芯片输出的数据通过该隔离器进入模拟电路部分中,进而对DDS和DAC芯片进行控制。

除了信号层,地线与公共端也要进行相对应的隔离处理<sup>[12]</sup>:

1)由于数字地中含有很多复杂的高频信号,让数字地与模拟地分开铺铜,以防止数字端高频尖锐噪声通过地线进入模拟端,间接影响模拟电路的准确度。

2)对于模拟地、电源地以及公共端,不能将所有的地线交叉在一起,地线要进行单点连接,模拟地和电源地铺在PCB的顶层和底层,公共端铺在地线层,并且每块模拟地铺铜之间使用磁珠进行过渡,如图10所示。

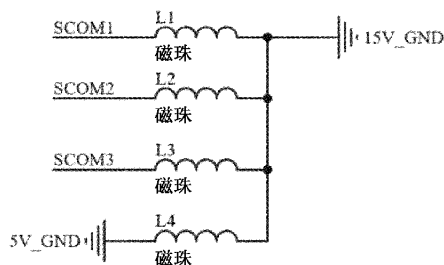


图10 不同模拟电路地线之间的连接

其中磁珠的功能是消除存在于传输线中的噪声,达到类似于衰减器的作用。磁珠比普通的电感有更好的高频滤波特性,在高频时呈现阻性,能把交流信号的能量转化为热能,减小公共端与不同地线之间的相互影响<sup>[13]</sup>。

综上硬件电路部分的设计基本完成,整体电路PCB采用六层板设计,层叠布局采用“顶层、地线层、信号层、信号层、电源层、底层”方式,图11是综合板电路实物图。

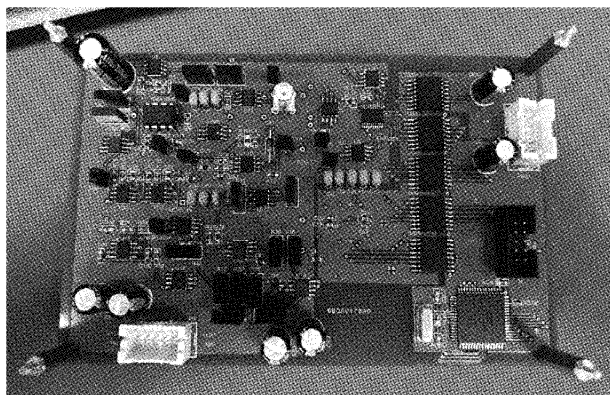


图11 综合板电路实物图

### 3 控制软件设计

根据硬件设计与对应功能,需要对ATmega128芯片的主要功能进行合理的流程设计,主控总体流程如图12所示,后续基于C语言在IAR for AVR平台进行程序编写以及软件调试。

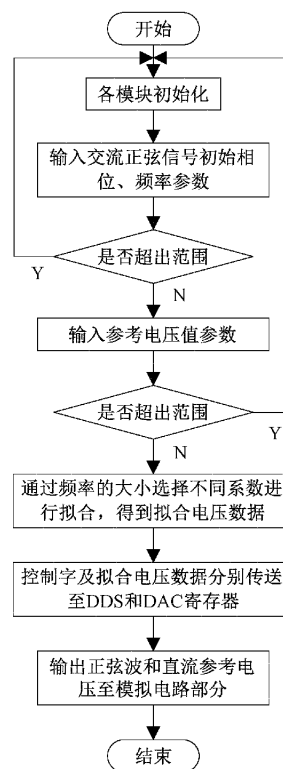


图12 软件总体流程

首先对各个模块进行初始化,初始化过程包含ATmega128芯片I/O端口初始化输出低电平状态,以及DDS芯片和DAC芯片端口初始化,初始化完成后分别设置正弦信号相位、频率初始参数和直流参考电压值。然后判断它们是否超出范围,若超出则返回开始阶段重新进行操作;若输入值均在范围内,则主控芯片将初始参数转换为相位、频率控制字,根据频率大小选择不同的拟合系数进行拟合<sup>[14]</sup>,得到修正后DAC所需数据代码。最后分别通过串行、并行方式将控制字传送到DDS和DAC寄存器中<sup>[15-16]</sup>,在它们输出端口分别得到正弦波和直流参考电压时结束任务。

### 4 测试验证

本文通过测量结果进行合理分析,标准源校准方法主要有标准表法、交直流转换法、交流分压器法等<sup>[17]</sup>,本文参考《JJF 1638-2017多功能标准源校准规范》选用标准表法对指标进行考核。标准表法是利用准确度更高的数字表来对标准源进行测量,并与设定值进行比较,使用Fluke 5790B交流电压标准表进行输出电压值的测试验证,使用

Keysight 3458A 数字多用表进行标准源输出频率的测试, 连线如图 13 所示。



图 13 标准表法连接示意图

完整的测试平台包括交流电压标准源电路板、直流电源、数字标准表和 PC 计算机, 指标测试前需要将标准设备和被测设备开机预热 2 h, 然后直接使用标准表对被测输出电压进行测试。

其中交流电压标准源的测量示值  $X_i$  与对应真实输出值  $X_r$  的相对误差为标准源的示值误差, 由于真值不能确定, 一般使用约定真值(即标准值)进行代替, 示值误差表示为:

$$\gamma_1 = \frac{|X_i - X_r|}{X_r} \times 100\% \quad (7)$$

稳定性也是十分重要的计量特性, 它表示仪器保持其计量特性恒定的能力, 是衡量输出电压在一段时间内发生波动的指标, 通过输出稳定后一段时间内发生的变化率表示:

$$\gamma_2 = \frac{|X_{\max} - X_{\min}|}{X_r} \times 100\% \quad (8)$$

保持测试环境不变, 某次测试结果如表 1 和 2 所示。

表 1 交流电压标准源输出满量程 10 V 测试数据表

输出频率/Hz	满量程实际输出示值			最大示值误差/%	稳定性/%
	最小值/V	最大值/V	$\Delta$ /V		
40	9.999 63	10.000 13	0.000 50	0.003 7	0.005 0
400	10.000 00	10.000 54	0.000 54	0.005 4	0.005 4
1 000	9.999 79	10.000 36	0.000 57	0.003 6	0.005 7
10 000	9.999 82	10.000 52	0.000 70	0.005 2	0.007 0
20 000	9.999 49	10.000 18	0.000 69	0.005 1	0.006 9
50 000	9.999 64	10.000 18	0.000 54	0.003 6	0.005 4
100 000	9.997 94	9.998 55	0.000 61	0.020 6	0.006 1

表 2 电路输出频率测试数据表

输出频率/Hz	频率测量值/Hz	相对误差/%
40	39.990 98	-0.022 5
400	400.008 90	0.002 2
1 000	1 000.0420 00	0.004 2
10 000	10 000.480 00	0.004 8
20 000	20 000.950 00	0.004 8
50 000	50 002.390 00	0.004 8
100 000	100 004.700 00	0.004 7

由表 1、2 可知, 交流电压标准源电路输出频率准确,

频率在 40 Hz~50 kHz 中交流电压输出准确度最佳, 满量程 10 V 点的允许误差均小于 0.006%, 标准源在 100 kHz 频率满量程允许误差可以保持在 0.025% 以内。经多次测试验证, 将所测数据与表 3 中 Fluke 5520A 指标对比, 可以得到在相同频率下本文设计电路指标优于 Fluke 5520A 的结果, 表明本文设计电路具有高准确度的特点。

表 3 Fluke 5520A 交流电压档部分量程性能指标

量程范围/V	频率/kHz	最大允许误差/%
0.33~3.3	0.045~10	0.014 0
	10~20	0.016 0
	20~50	0.025 0
	50~100	0.055 0
3.3~33	0.045~10	0.012 5
	10~20	0.022 0
	20~50	0.030 0
	50~100	0.075 0

### 5 结 论

本文提供了一种高准确度交流电压标准源电路的设计思路, 整体采用闭环反馈的控制方式, 整个电路共分为 5 个模块, 以 ATmega128 芯片为主控, AD9850 芯片作为信号源发生器, MAX6350 与 AD5791 芯片共同作用生成直流参考电压, 通过反馈、模拟电路调理等方式将 AD9850 输出信号的幅值调制到指定大小。电路通过磁耦隔离器件对数字信号与模拟信号进行电气隔离, 并在 PCB 设计中采用隔离地线、单点接地等处理方案, 提高了电路的抗干扰能力。在软件中设计了单片机控制输出与误差修正等程序, 进一步提高输出精度。该标准源输出电压范围 1~10 V、频率范围 40 Hz~100 kHz, 经测试交流电压输出误差控制在极小的范围当中, 稳定性、线性度、重复性等输出指标均满足设计要求, 相较于原有的交流电压标准源, 本设计在输出指标、频带宽度上有明显提高, 对于后续交流电压标准源的设计研制具有较高的工程参考价值。

### 参考文献

- [1] 梁志国. 国防军工电学计量的现状及发展[J]. 中国计量, 2004(4): 28-29.
- [2] 陈波. 高精度动态电压电流标准源精度提升方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [3] 薛巨峰, 李壮, 周彤, 等. 高精度标准源中低频信号源的设计与分析[J]. 机电工程, 2016, 33(2): 232-236, 241.
- [4] 段亦韩. 高精度高分辨率数字合成交流电压标准源设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] 金巳婷, 吕闪, 罗魏魏, 等. 基于 AD9850 的脉冲信号发生器的研究与设计[J]. 计算机与数字工程, 2017,

- 45(8): 1675-1676,1686.
- [6] 张海涛, 苗圃, 李珍. DDS 杂散抑制技术与仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(2): 397-401.
- [7] 王晓敏. 基于热电转换原理的交流电压精确测量技术[C]. 四川省电子学会电子测量与仪器专委会第十五届学术年会论文集, 2011: 111-115.
- [8] SHI Z M, ZHANG J T, PAN X L, et al. AC-DC transfer system for ultra-low frequency voltage[C]. 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), IEEE, 2020: 1-2, DOI: 10.1109/CPEM49742.2020.9191901.
- [9] PILSNIAK A, KAMPIK M. An Externally linear-internally nonlinear RMS-to-DC converter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-6, DOI: 10.1109/TIM.2021.3057652.
- [10] SAFARI L, BARILE G, STORNELLI V, et al. A new versatile full wave rectifier using voltage conveyors [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2020, 122: 153267, DOI: 10.1016/j.aeue.2020.153267.
- [11] 贾冬宇, 严明, 冯荣尉. 交直流转换电路的电路参数误差分析[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(1): 60-67.
- [12] 梁晨, 于骏申, 黄松威. 多通道采集系统接地方式研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(2): 169-171,175.
- [13] 周雍, 夏微微, 金力. 从电磁兼容角度浅谈数字地与模拟地[J]. 零八一科技, 2010(2): 31-33.
- [14] 邵建新. 最小二乘法线性拟合中参数的确定问题[J]. 大学物理, 2003(1): 23-24.
- [15] 张国光. 基于 DDS 的高精度多路信号发生系统研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(4): 125-129.
- [16] 薛巨峰, 李壮, 鲁志军. 基于 20 位 DAC—AD5791 的高精度电压源的设计[J]. 电子技术, 2015, 44(9): 59-62.
- [17] 王一丽, 吴敏婕, 朱剑平, 等. 多功能标准源校准方法的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(S1): 15-18.

### 作者简介

贾冬宇, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为微弱信号测量与校准。

E-mail:jiady777@163.com

冯荣尉, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电学计量仪器研发。

E-mail:fengrwry@163.com

温星曦, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电信号测试与计量。

E-mail:wenxingxi89@163.com

李爽玉, 硕士研究生, 主要研究方向为微弱信号测量与校准。

E-mail:lsyhebut@163.com