

基于 DDS 的信号相位同步设计技术

彭海军

(中国电子科技集团公司第四十一研究所电子信息测试技术安徽省重点实验室 蚌埠 233006)

摘要:要实现对被测件 DUT 的电阻、电容、电感、品质因数等参数的测量,其核心就是进行阻抗测量。目前,实现阻抗测量的方法有很多,如电桥法、谐振法、电压-电流法、RF 电压-电流法、网络分析法、自动平衡桥法等,每种方法都有各自的优缺点。在采用自动平衡桥方法实现阻抗测量的设计中,激励源电路和调制-解调电路的信号发生功能分别采用 2 个 DDS 实现,要使自动平衡桥快速准确地达到平衡状态,根据不同的测量频率,要求 2 个 DDS 输出信号相位同步。本文从参考时钟信号、更新时钟信号和参考时钟倍频器 3 个方面进行处理,具有设计简单、易于实现,在 LCR 表、电容表、阻抗分析仪、函数发生器等众多领域应用广泛。

关键词: 阻抗测量;自动平衡桥;DDS;参考时钟;更新时钟;倍频器

中图分类号: TP335 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Design techniques of signal phase synchronization based on DDS

Peng Haijun

(Anhui Province Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, The 41st Institute of CETC, Bengbu 233006, China)

Abstract: To measure DUT's resistance, capacitance, inductance, quality factor and so on, the core is to carry out impedance measurement. At present, there are many impedance measurement methods to choose, such as bridge method, resonant method, I-V method, RF I-V method, network analysis method, auto-balancing bridge method, etc. Each of the methods has advantages and disadvantages. In the design of impedance measurement using auto-balancing bridge method, the signal generating function of the signal source circuit and the modulation- demodulation circuit are respectively adopted by two DDS. In order to achieve the balance of the auto-balancing bridge quickly and accurately, according to different measurement frequency, demand phase synchronization of two DDS output signals. In this paper, deal with three aspects of the reference clock signal, the update clock signal and the reference clock multiplier, have simple design, easy to achieve. Widely used in many fields such as LCR meter, capacitance meter, impedance analyzer, function generator, etc.

Keywords: impedance measurement; auto-balancing bridge; DDS; reference clock; update clock; frequency multiplier

1 引言

在电子测量技术中,电阻 R、电容 C、电感 L 是最基本的元器件,也是使用最多的元器件,要实现元器件参数的测量,其核心就是进行阻抗测量,根据阻抗值可计算出其他参数值。实现阻抗测量的方法有很多,如电桥法、谐振法、电压-电流法、RF 电压-电流法、网络分析法、自动平衡桥法等,每种方法都有各自的优缺点。当测量频率 $f=20\text{ Hz}\sim 110\text{ MHz}$ 时,自动平衡桥方法具有测量精度高、测量速度快、阻抗测量范围广等优点^[1]。在采用自动平衡

桥方法实现阻抗测量的设计中,激励源电路和调制-解调电路分别采用 2 个 DDS 信号发生电路,要使自动平衡桥快速准确地达到平衡状态,根据不同的测量频率,需要进行相位调节,即 2 个 DDS 输出信号相位需要同步^[2]。

2 系统设计

采用自动平衡桥方法实现阻抗测量的设计原理如图 1 所示,主要包括:被测件 DUT、激励源电路、过零检测电路、调制-解调电路、量程电阻转换电路、DDS 信号发生电路、鉴相电路、A/D 转换器、FPGA、存储器、接口电路等。

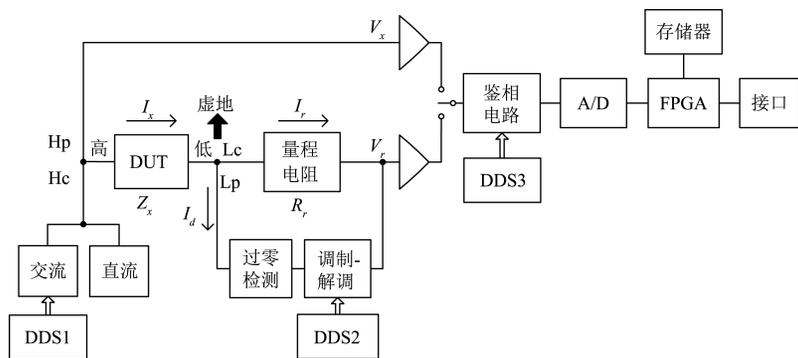


图1 采用自动平衡桥方法实现阻抗测量的原理

本文采用标准四端口设计,即 Hc 端、Hp 端、Lp 端、Lc 端。Hc 为激励源端,是交流信号和直流信号相叠加,施加到被测件 DUT 的高端。Hp 为被测件高端电压测量端,对被测件上电压 V_x 进行测量。Lc 为量程电阻端,根据被测件阻抗值,选择相应的量程电阻档位,并对量程电阻 R_r 上电压 V_r 进行测量。Lp 为误差电流端,为被测件上电流 I_x 与量程电阻上电流 I_r 的差值^[3]。

激励源电路给自动平衡桥提供激励源,由交流信号叠加直流信号形成。交流信号采用 DDS 来实现,选用 ADI 公司的 AD9854,它的内部系统时钟最大可以到 200 MHz,直流信号采用 16 位 D/A 转换器产生。交流信号和直流信号通过运算放大器进行叠加,并经过信号放大电路进行信号处理,送至 Hc 端。

量程电阻转换电路采用多个不同的标准电阻和开关电路组成,根据被测件阻抗的大小进行换挡,标准电阻精度为 $\pm 0.01\%$,温漂为 ± 5 PPM/ $^{\circ}\text{C}$,可以有效提高阻抗测量精度和测量范围。

被测件低端为自动平衡桥的虚地点,当自动平衡桥没有达到平衡状态时,即 Lp 端误差电流 I_d 不等于零,经过零检测电路和调制-解调电路,进行相应转换和处理,包括进行幅度调节和相位调节,最后反馈到量程电阻上,以减小被测件上电流 I_x 与量程电阻上电流 I_r 的差值,直到 $I_x = I_r$,即误差电流 I_d 等于零,自动平衡桥达到平衡状态^[4]。

当自动平衡桥达到平衡状态后,分别测量被测件高端电压 V_x 和量程电阻电压 V_r ,这两路信号分别经过缓冲器送给鉴相电路,鉴相电路采用自由轴原理,主要由乘法器、积分器、参考信号发生器等部分组成,其中参考信号发生器输出 2 路幅度相等、频率相等、相位相差 90° 的参考信号 V_0 和 V_{90} ,分时选择电压信号 V_x 和 V_r 进入鉴相电路,分别得到所选信号在 V_0 方向分量和在 V_{90} 方向分量。若鉴相电路的参考信号 $V_0 = x \cdot \sin(\omega t + \alpha)$, $V_{90} = x \cdot \cos(\omega t + \alpha)$,输入信号 $V_x = y \cdot \sin(\omega t + \beta)$, $V_r = y \cdot \sin(\omega t + \beta)$,经乘法器可得:

$$V_0 \cdot V_x = xy \cdot \sin(\omega t + \alpha) \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad V_0 \cdot V_x = xy \cdot \sin(\omega t + \alpha) \cdot \sin(\omega t + \beta) =$$

$$\frac{xy}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(2\omega t + \alpha + \beta)] \quad (1)$$

从式(1)可以看出,乘法器的输出信号中包含 2 种分量,直流分量 $\frac{xy}{2} \cdot \cos(\alpha - \beta)$ 和交流分量 $-\frac{xy}{2} \cdot \cos(2\omega t +$

$\alpha + \beta) - \frac{xy}{2} \cdot \cos(2\omega t + \alpha + \beta)$,经积分器处理,即对式(1)进行积分可得:

$$\int_{-\pi/4}^{2\pi-\pi/4} V_0 \cdot V_x d(\omega t) = \int_{-\pi/4}^{2\pi-\pi/4} \frac{xy}{2} \cdot \cos(\alpha - \beta) d(\omega t) = \pi xy \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad (2)$$

经积分器处理后的输出信号中交流分量为零,直流分量为 $\pi xy \cdot \cos(\alpha - \beta)$,这个直流分量即为输入信号 V_x 在参考信号 V_0 上的分量,同理可得输入信号 V_x 在参考信号 V_{90} 上的分量,以及输入信号 V_r 在参考信号 V_0 和 V_{90} 上的分量^[5]。

被测件阻抗值 Z_x 根据自动平衡桥原理,可由式(3)表示:

$$Z_x = \frac{V_x}{I_x} = \frac{V_x}{I_r} = R_r \cdot \frac{V_x}{V_r} \quad (3)$$

若 $V_x = a + jb$, $V_r = c + jd$,则被测件阻抗值 Z_x 可按式(4)进行计算:

$$Z_x = R_r + jX_x = R_r \cdot \frac{V_x}{V_r} = R_r \cdot \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + jR_r \cdot \frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \quad (4)$$

在式(4)中, a 、 b 、 c 、 d 的值,均由 A/D 转换为数字量,送给 FPGA,最后通过接口送到 CPU 板中进行阻抗计算,即可计算出被测件的 R_x 值和 X_x 值,经进一步计算,可得出被测件的导纳 Y 、电导 G 、电纳 B 、品质因数 Q 、损耗因数 D 等参数^[6]。

另外,FPGA 还负责通过接口电路接收 CPU 板发出的控制命令,控制整个电路工作。存储器主要用于存储各种校准数据。

3 DDS 输出信号相位同步设计

在本文中,一共有3个信号发生电路:激励源电路、调制-解调电路、鉴相电路,分别使用3个DDS来实现,依次记为DDS1、DDS2、DDS3。由于在鉴相电路中,采用自由轴原理,因此DDS3输出信号的相位跟DDS1和DDS2没有同步要求。而在自动平衡桥电路中,激励源电路和调制-解调电路中的DDS输出信号,根据不同的测量频率,需要进行相位调节,否则自动平衡桥不能达到平衡状态,因此DDS1和DDS2输出信号相位需要同步。

为了实现2个DDS输出信号相位同步,在设计中,着重从参考时钟信号、更新时钟信号和参考时钟倍频器3个方面进行处理。

3.1 参考时钟信号

如果2个DDS的参考时钟信号间有任意的相位差,都将会导致输出信号的相位差被成比例的放大,因此要实现2个DDS输出信号相位同步,必须使提供给2个DDS的参考时钟信号相位相同。

DDS的参考时钟有2种输入形式:差分输入和单端输入。由于差分输入时钟在脉冲边沿具有更短的上升和下降时间以及更小的抖动率,可以有效地降低2个DDS参考时钟间的相位误差。因此,DDS参考时钟采用差分输入方式^[7]。

2个DDS的参考时钟信号必须使用同一个时钟信号,而且在PCB布局布线时,需要特别注意的是,必须按图2所示方式,2个DDS的参考时钟必须走等长线,以减小线路延迟所带来的相位差。

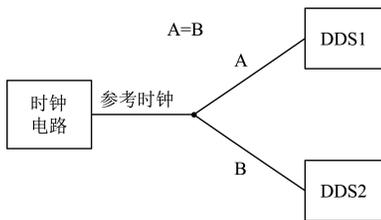


图2 两个DDS参考时钟布线示意

在PCB设计时,考虑到电路其他部分对DDS的参考时钟信号会有一些影响,因此对参考时钟信号采用GND信号进行屏蔽,以将外部影响减小到最低^[8]。

3.2 更新时钟信号

在FPGA通过串口对DDS进行编程时,输入数据被暂存在内部的I/O缓冲寄存器中,不会影响DDS的工作状态,只有在更新时钟的上升沿来到后,经过DDS内部的边沿检测电路后与系统时钟同步,形成上升沿,触发I/O缓冲寄存器的内容传送给内部各控制寄存器,完成相应的操作,才能实现对输出信号的控制。

DDS的更新时钟有两种方式:DDS内部自动产生和DDS外部提供。内部更新时钟方式:FPGA通过对更新

时钟寄存器进行编程,内部产生固定周期的更新时钟;外部更新时钟方式:由FPGA通过DDS的引脚I/O UD给DDS提供更新时钟。由于内部更新时钟方式产生的是固定周期的更新时钟,不易外部控制,要实现2个DDS输出相位同步,DDS应采用外部更新时钟方式,以确保更新时钟的上升沿保持同相位^[9]。

在FPGA设计中,对2个DDS进行控制时,分别写入每个DDS的控制字、数据字后,要求同时发出2个DDS的更新时钟,而且在PCB布局布线时,这两个更新时钟必须走等长线,以实现2个DDS更新时钟的同相位。

3.3 参考时钟倍频器

DDS内部具有参考时钟倍频器,可以将外部输入的参考时钟进行倍频,作为DDS系统时钟,但是倍频器使能后,将明显增大DDS功耗。因此综合考虑,为降低功耗和保证输出信号质量,只有在测量频率大于2MHz时,才使能DDS参考时钟倍频器。在DDS倍频器使能后,必须进行合理设计和控制,才能实现2个DDS输出信号相位同步^[10]。如图3所示为使能DDS内部倍频器的写时序。

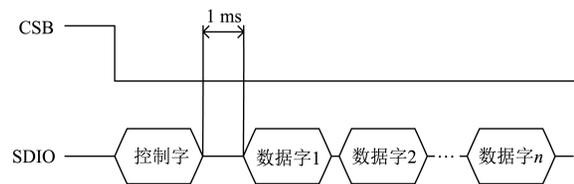


图3 使能DDS倍频器的写时序

当FPGA给DDS写控制字时,参考时钟倍频器工作后的短时间内,不能立刻达到锁定状态,这时如果对DDS写数据字,将导致DDS内部相位累加器的系统时钟周期个数是不可控的,这将直接引起2个DDS输出信号相位不同步。由于每个DDS倍频器的锁定时间并不一致,并且同一个DDS在不同的温度和湿度下,锁定时间也会发生变化,典型的锁定时间在400μs左右,但是,为确保DDS倍频器进入锁定状态,在写完控制字后,写第一个数据字前,这段时间至少预留1ms^[11]。

要实现2个DDS输出信号相位保持同步,除了以上3个方面外,还要求FPGA送给2个DDS的数据线、时钟线、复位线在PCB布局布线时也必须走等长线。

4 实验结果

在采用自动平衡桥方法实现阻抗测量的设计中,根据不同的测量频率,要使自动平衡桥快速准确地达到平衡状态,激励源电路和调制-解调电路的DDS输出信号需要进行相位调节,调节范围在0°~360°。在FPGA对DDS进行控制时,固定激励源电路DDS1输出信号相位,调节调制-解调电路DDS2输出信号相位。DDS的相位寄存器为

14 bit, 当由“全0”变为“全1”时, 输出信号相位相应地由 0° 变为 360° 。

图4所示为测量频率 $f=1\text{ MHz}$, 即周期 $T=1\ \mu\text{s}$, 利用示波器测得2个DDS输出信号, 从图中可以看出, 它们频率相同, 相位延迟 $dT=50\text{ ns}$, 可得出2个DDS输出信号相位相差 18° 。

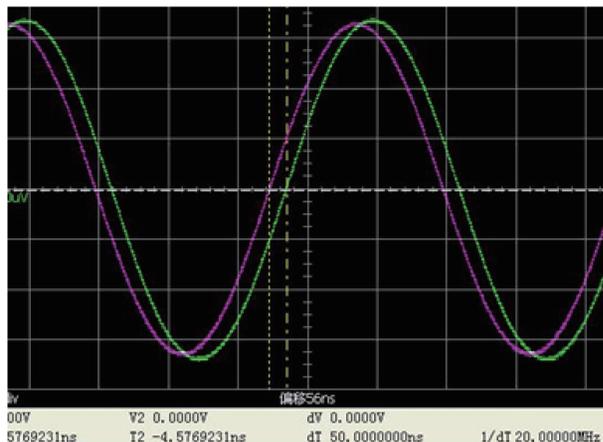


图4 两个DDS输出信号相位相差 18°

在采用自动平衡桥方法实现的阻抗测量设计中, 常规方法是直接使用运算放大器, 利用运算放大器的虚短原理, 使得自动平衡桥达到平衡状态。本文采用过零检测电路和调制-解调电路, 形成负反馈环路, 运用DDS输出信号相位同步技术, 使得自动平衡桥能够快速准确地达到平衡状态, 具有测量速度快、测量精度高、测量范围广等特点。如表1所示为阻抗测量设计中采用常规方法和本文方法的性能对比表, 从表中可以看出, 常规方法测量速度为 19 ms , 而本文方法可以达到 0.9 ms , 提高20倍以上; 常规方法基本测量精度为 0.5% , 而本文方法可以提高到 0.1% ; 本文方法相比常规方法, 阻抗测量范围得到较大扩展。

表1 性能对比表

测量方法	测量速度	测量精度	测量范围
常规方法	19 ms	0.5%	$10\text{ m}\Omega\sim 10\text{ k}\Omega$
本文方法	0.9 ms	0.1%	$1\text{ m}\Omega\sim 10\text{ M}\Omega$

5 结论

在采用自动平衡桥方法实现阻抗测量的设计中, 要使自动平衡桥快速准确地达到平衡状态, 要求激励源电路和

调制-解调电路的DDS输出信号相位同步, 可以进行相位调节。本文着重从DDS参考时钟信号、更新时钟信号和参考时钟倍频器3方面进行处理, 使得DDS输出信号相位调节范围为 $0^\circ\sim 360^\circ$, 在测量速度、测量精度、测量范围等方面性能得到很大提升, 且设计简单、易于调试, 广泛应用于LCR表、电容表、阻抗分析仪等众多领域。

参考文献

- [1] 李文强, 黄刚, 杨录. 大量程全自动阻抗测量仪研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 859-865.
- [2] 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.
- [3] 白力军, 张冠宇, 苏志强, 等. 任意频点双混频时差测量方法及仪器的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 500-506.
- [4] 许志鹏, 余剑. 锁相环中鉴相器的设计与仿真[J]. 电子测量技术, 2011, 34(11): 32-35.
- [5] 张红. 电力信号同步采样算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(3): 91-96.
- [6] 冯佳, 李佩玥, 徐立松, 等. 基于反馈的交流激励式电容测量电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 38-42.
- [7] 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.
- [8] 董建晶, 张晓青. 基于FPGA与AD9854的宽带扫频信号源设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(11): 65-69.
- [9] 朱卫华, 刘国稳, 李月华, 等. 基于TM4C123G微处理器的宽量程全自动电容测量仪设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(7): 85-88.
- [10] 陈红远, 郭天太, 吴俊杰, 等. 多通道微弱电压信号同步采集系统开发[J]. 电子技术应用, 2014, 40(2): 78-84.
- [11] 刘明成, 刘瑞安. 基于AD9852多模式信号的应用研究[J]. 天津师范大学学报, 2011, 31(3): 59-62.

作者简介

彭海军, 1984年出生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为半导体器件测试、数字存储示波器等。

E-mail: dqphj007@163.com