

# 超声检测系统校准装置的研制

张义凤<sup>1,2</sup>, 薛 峰<sup>1,2</sup>, 丁 杰<sup>1,2</sup>

(1.上海材料研究所, 上海 200437; 2.上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437)

**摘 要:** 针对现有超声检测系统校准装置频带较窄、便携性差、现场操作不便等问题, 通过对超声检测系统校准技术的原理、方法与标准等进行分析研究, 采用现场可编程门电路(FPGA), 利用 DDS(直接数字频率合成)技术形成正弦信号发生器, 并通过集成数字衰减器, 研制出了频率范围更广、频率精度更高、体积更小、质量更轻、集成度更高的超声检测系统校准装置。通过与国内同类设备校准结果的比较, 表明该新型校准装置完全满足相关计量规程、校准规范和标准的要求, 与国内同类设备的校准水平相当, 并更适用于工业现场大型超声检测系统的校准。

**关键词:** 超声检测系统; 校准装置; FPGA; DDS

中图分类号: TG115.28      文献标志码: A      文章编号: 1000-6656(2020)06-0063-05

## Development of calibration device for ultrasonic testing system

ZHANG Yifeng<sup>1,2</sup>, XUE Feng<sup>1,2</sup>, DING Jie<sup>1,2</sup>

(1.Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China;

2.Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** Aiming to solve problems faced by existing calibration devices for ultrasonic testing systems, such as narrow frequency band, poor portability and inconvenient on-site operation, analysis and research on the principles, methods, and standards of calibration techniques for ultrasonic testing systems were then undertaken. As a result, field programmable gates (FPGA) were used to forms a sinusoidal signal generator with DDS (direct digital frequency synthesis) technology, and by integrating a digital attenuator, an ultrasonic detection system with a wider frequency range, higher frequency accuracy, smaller volume, lighter weight, and higher integration has been developed. Through comparative research with the calibration results of similar domestic equipment, the calibration results of the new calibration device fully meet the requirements of relevant measurement regulations, calibration specifications and standards, which are comparable to the calibration level of similar domestic equipment, and are more suitable for large-scale ultrasonic inspection systems on industrial sites calibration.

**Key words:** ultrasonic testing system; calibration device; FPGA; DDS

超声检测系统校准装置主要用于对手持式超声检测仪或在线多通道超声检测系统进行计量检定, 以确保超声检测系统性能符合相关计量检定规程的规定, 能够有效开展检测工作。对于超声检测仪的检定, 国内主要依据的检定规程为 JJG 746—2004《超声探伤仪检定规程》, 同时还可依据 GB/T 27664.1—

2011《无损检测 超声检测设备的性能与检验 第 1 部分: 仪器》和 GB/T 28880—2012《无损检测 不用电子测量仪器对脉冲反射式超声检测系统性能特性的评定》等对超声仪器性能进行校验和评定。常用的校准仪器为 ZJ-2A 型<sup>[1]</sup>和 DF8010 型超声探伤仪校准装置。国外主要依据标准为 EN 12668-1:2010 *Non-destructive Testing-Characterization and Verification of Ultrasonic Examination Equipment Part 1: Instruments* 和 ASTM E317—2016 *Standard Practice for Evaluating Performance Characteristics of Ultrasonic Pulse-Echo Testing Instruments and*

收稿日期: 2020-02-13

基金项目: 上海市工业强基专项(GYQJ-2017-4-06)

作者简介: 张义凤(1978—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事先进无损检测技术研究

通信作者: 张义凤, zhangyifeng\_ndt@163.com

*Systems without the Use of Electronic Measurement Instruments*,使用仪器主要为示波器、脉冲信号发生器和衰减器或其组合设备等。国内现有超声仪器校准装置由于体积较大,主要适用于实验室校准环境;同时装置内部元器件多采用传统物理连接方式,在需进行现场校准的运输过程中,易出现导线松动失效导致校准出现偏差甚至无法校准的情形;此外,新型高性能水浸超声系统频率范围为 20 MHz~30 MHz<sup>[2]</sup>;而现有校准装置频率范围多为 0.5 MHz~15 MHz<sup>[3-4]</sup>,已无法满足新设备校准的要求。笔者采用现场可编程门电路(FPGA),利用 DDS(直接数字频率合成)技术形成正弦信号发生器,并通过集成数字衰减器,研制出了频率范围更广、频率精度更高、体积更小、质量更轻、集成度更高的超声检测系统校准装置。

1 方法论述

1.1 基本原理

超声检测系统的校准是指基于校准规程或性能测试标准提供的方法,综合评定反映被校设备电性能和声学性能等参数的示值误差,以确保被校设备量值符合相关要求的操作过程。校准装置将来自于超声波检测系统的高压负脉冲转换为 TTL 电平的内部触发脉冲后,根据接收到的外部输入指令调节信号的幅值、延时、数量等,经基于 FPGA 的直接数字频率合成电路生成猝发正弦波脉冲串,即标准正弦函数信号,再经标准衰减器,对超声检测系统性能

参数进行校准。

1.2 系统组成

如图 1 所示,超声检测系统校准装置主要由电源管理模块、面板控制模块、脉冲调制高频猝发信号发生模块、标准衰减器模块、输入/输出保护模块、显示和通讯模块等组成。

装置中的电源管理模块包含 AC220V 电源转换模块、锂电池模块和 5 V 电源管理模块,主要功能是电压转换及电源/电池供电模式转换。面板控制模块包含按键/旋钮开关,集成频率、增益和延时旋钮等,采用旋转编码器实现无级调节;按钮则采用 4×4 矩阵按键,用于输入需要的控制指令。脉冲调制高频猝发信号发生模块采用可编程逻辑控制器 FPGA,利用 DDS 技术形成校准所需要的一定频率范围内的猝发正弦波脉冲信号。标准衰减器模块包括数字衰减电路和 20 dB 衰减模块,用于调节信号幅值,标准衰减器包含档位 10,1,0.1 dB,总衰减量为 100 dB,衰减精度为 0.1 dB。输入/输出保护模块包括连接被检仪器和 FPGA 的触发通道、高压脉冲转换电路以及输出通道和反向电压保护电路,高压脉冲转换电路的主要功能是将 50~400 V 脉冲电压转换成 3~5 V 正脉冲,反向高压保护电路是为防止误将高压脉冲接入到设备输出端而造成设备损坏而设置的。在显示方面利用 STM32F103 微处理器控制 2.4 in.(1 in.=25.4 mm)的液晶显示器,利用串口和 FPGA 主处理器通讯,可以同时显示输出信号频率、猝发数量、延时时间、幅度等参数值。

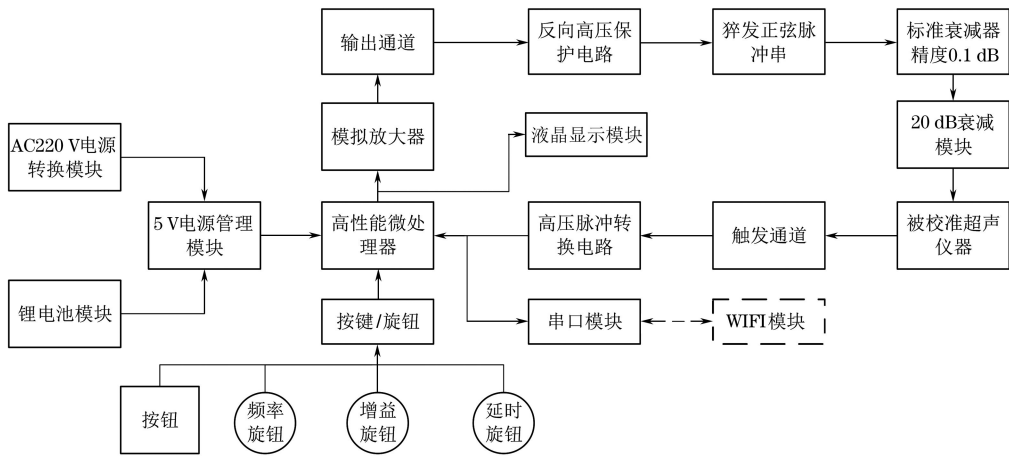


图 1 超声检测系统校准装置硬件框图

1.3 猝发正弦脉冲信号的产生

超声检测系统的校准是指由被校设备产生触发脉冲输入到校准装置中,校准装置产生猝发信号后再输入到被校装置中,利用猝发信号对设备进行计

量校准。因此,猝发正弦脉冲信号的产生是校准装置输出的关键部分。如图 2 所示,超声波检测系统发出 50~400 V 的高压负脉冲,通过脉冲转换器转换成 5 V 的触发脉冲输送给 FPGA 主处理器,主处

理器根据用户设定的频率、幅度、延迟、猝发脉冲数量等参数,利用 DDS 技术生成数字波形信号,并缓存在 W25Q16DV 串行数据存储器上,经过 12 位数模转换芯片 MCP4822 转换成模拟信号,经高速线性放大器 AD8009 放大后输出。DDS 是一种把一系列数字信号通过 D/A 转换器转换成模拟信号的数字频率合成技术<sup>[5]</sup>,其本质上实现了一个数字分频器的功能。DDS 技术可以产生任意波形信号,超声校准装置只需产生猝发正弦波信号。DDS 的结构框图如图 3 所示,主要由相位累加器、波形存储器、数模(D/A)转换器和低通滤波器等组成,相位累加器由  $N$  位加法器与  $N$  位累加寄存器构成<sup>[6]</sup>。在时钟源参考频率驱动下,累加器每次累加一个频率控制字,调节频率控制字的数值,可以改变累加器的累加速度,进而可以调节从 ROM(只读存储器)查找表中读取波形数据的速度。相位控制字可以用来调节初始相位,即 ROM 地址自加的初始值。DDS

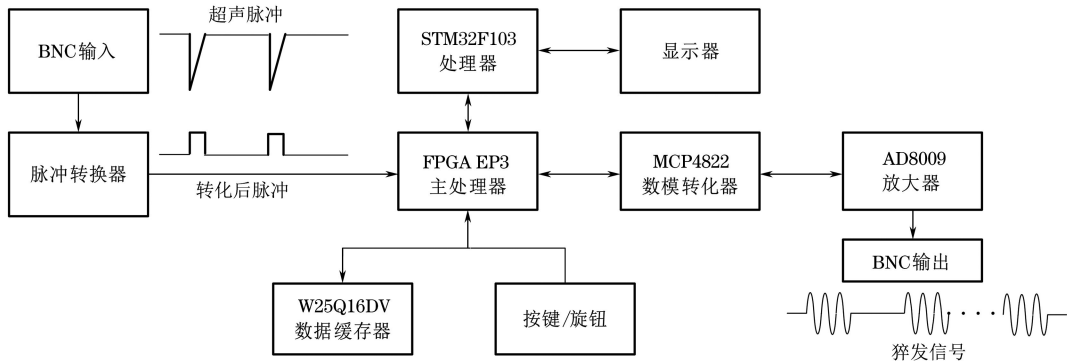


图 2 猝发正弦脉冲信号发生框图

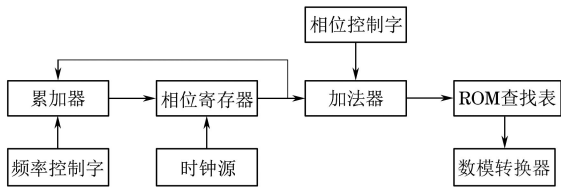


图 3 DDS 基本结构框图

1.4 校准装置主要特点和技术指标

1.4.1 主要特点

研制的 SRIMNDT GX-1 型超声检测系统校准装置主要特点如下所述。

(1) 采用集成化设计,所有电子元器件均集成到高速电路板上,表面贴装工艺大大提高了设备的抗干扰能力和使用寿命;小型化设计也提高了装置的便携性,以及长途运输后的设备稳定性和可靠性,从而保证了校准结果的准确和可靠。

(2) 基于优越的 FPGA 性能和先进的 DDS 技术,提高了校准装置可校准的频率范围,以及频率的

的输出频率  $f_{out}$  是系统工作频率  $f_{clk}$ 、相位累加器比特数  $N$  以及频率控制字  $K$  三者的函数,如式(1)所示<sup>[7]</sup>。

$$f_{out} = \frac{f_{clk}}{2^N} \times K \quad (1)$$

DDS 的频率分辨率,即频率变化间隔,可用式(2)表示<sup>[7]</sup>。

$$\Delta = f_{clk} / 2^N \quad (2)$$

根据式(1),当系统工作频率和相位累加器比特数确定后,频率控制字越大,DDS 输出频率就越高。但根据奈奎斯特采样定理,输出频率不能高于工作频率的一半<sup>[8]</sup>;同时受到输出滤波器的影响,最终的输出频率约为工作频率的 30%~40%。实际设计中,系统最高工作频率为 200 MHz,最高输出频率达 60 MHz,可以满足对高频系统校准的要求。同时根据式(2),通过选择不同的累加器比特数和系统工作频率可以控制系统能够达到的频率精度。

准确度和稳定度。

(3) 丰富的用户界面(UI)设计使操作更简便、更智能,如当前设置的参数可以自动保存,在重新开始校准同类设备时无须再次调节参数等。

1.4.2 技术指标

表 1 给出了 SRIMNDT GX-1 型校准装置的主要性能指标,同时与国内主要的 ZJ-2A、DF8010 型超声仪器校准和检定装置的性能参数进行了比较,各校准装置实物图片如图 4~6 所示。由表 1 可见,

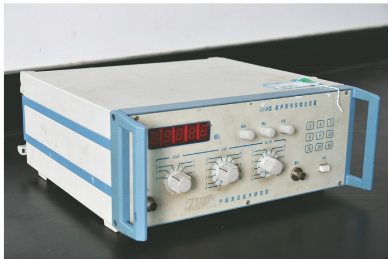


图 4 ZJ-2A 型校准装置实物图片

表 1 国内同类超声仪器校准装置的性能参数

项目	型号 ZJ-2A	型号 DF8010	型号 SRIMNDT GX-1
生产厂家	中国测试技术研究院	北京东方计量测试研究所	上海材料研究所
频率范围/MHz	0.5~15	0.5~30	0.1~60
频率准确度	$5\times 10^{-4}$	$1\times 10^{-4}$	$2\times 10^{-5}$
频率稳定度	$5\times 10^{-4}$	$1\times 10^{-4}$	$1\times 10^{-6}$
猝发包含的正弦波个数	5~40	1~20	0~1 000
衰减范围/dB	0~81	0~101	0~100
最小分档/dB	0.1	0.1	0.1
衰减误差/dB	$0.5\%A\pm 0.02,A$ 为衰减量	$0.5\%A\pm 0.02,A$ 为衰减量	$0.5\%A\pm 0.02,A$ 为衰减量
显示方式	数码管	数码管	液晶显示屏
操作方式	按键/旋钮	按键/旋钮	按键/旋钮
续航方式/能力	外接电源	外接电源	外接电源/电池
单机质量/kg	约 5.2	约 3.0	约 1.0



图 5 DF8010 型校准装置实物图片



图 6 SRIMNDT GX-1 型校准装置实物图片

SRIMNDT GX-1 型超声检测系统校准装置在频率范围、频率准确度、频率稳定度以及操作便携性等方面均优于国内同类设备。

2 试验结果

2.1 校准装置可以校准的参数

表 2 给出了所研制的校准装置基于 JJG-746—2004

表 2 校准装置可以校准的参数

类型	JJG 746—2004	EN 12668-1:2010
水平线性误差	✓	✓
衰减器衰减误差	✓	✓
垂直线性误差	✓	✓
动态范围	✓	✓
最大使用灵敏度	✓	—
放大器频率响应	—	✓
等效输入噪声	—	✓

和 EN 12668-1:2010 能够校准的参数,可见其能满足超声检测系统校准规程和标准的要求。

2.2 校准结果的比较

同时采用 ZJ-2A 型和 SRIMNDT GX-1 型超声检测系统校准装置,基于 EN 12668-1:2010,对某型双通道超声检测系统进行了校准。由于垂直显示线性是较为有代表性的校准参数,故以该参数为例进行对比,校准结果如表 3 所示(表中的 % 表示全屏幅度的百分比)。

表 3 垂直显示线性校准结果

外部衰减器 设定值/dB	所显示信号幅 度的理论值/%	验收指标/ %	实测值/%	
			ZJ-2A	SRIMNDT GX-1
1	90	88~92	90.2	90.2
2	80	基准线	80	80
4	64	62~66	65.6	63.8
6	50	48~52	48.5	49.7
8	40	38~42	38.6	40.5
12	25	23~27	24.3	24.5
14	20	18~22	19.2	19.8
20	10	8~12	8.4	10.2
26	5	3~7	4.3	5.5

由表 3 可知,SRIMNDT GX-1 型校准装置的校准结果完全满足相关标准要求,并与国内同类设备的校准水平相当。

2.3 不确定度评定

鉴于垂直线性误差引入的不确定度分量基本涵盖了超声检测系统校准装置的主要技术指标,所以以其为例进行误差分析,以检验校准装置是否符合相关校准规程的要求。

垂直线性误差不确定度分量如表 4 所示(表中  $c_i$  为第  $i$  个不确定度分量的灵敏参数,  $u_i$  为第  $i$  个不确定度分量)。

表 4 垂直线性误差 不确定分量

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度/%	灵敏系数 $c_i$	$ c_i u_i/\%$
垂直线性最大正偏差的绝对值标准不确定度 $u(\Delta_{+\max})$	测量重复性所引入的标准不确定度 $u_{1+}$	0.1%	$c_{1(\Delta_{+\max})}=1$	0.3
	校准装置函数信号发生器的频率稳定度引入的不确定度 $u_{2+}$	$0.6\times 10^{-6}$		
	校准装置函数信号发生器的频率准确度引入的不确定度 $u_{3+}$	$1.2\times 10^{-5}$		
	校准装置中标准衰减器引入的标准不确定度 $u_{4+}$	0.1		
	读数误差引入的标准不确定度 $u_{5+}$	0.3		
垂直线性最大负偏差的绝对值标准不确定度 $u(\Delta_{-\max})$	测量重复性所引入的标准不确定度 $u_{1-}$	0.05	$c_{2(\Delta_{-\max})}=1$	0.3
	校准装置函数信号发生器的频率稳定度引入的不确定度 $u_{2-}$	$0.6\times 10^{-6}$		
	校准装置函数信号发生器的频率准确度引入的不确定度 $u_{3-}$	$1.2\times 10^{-5}$		
	校准装置中标准衰减器引入的标准不确定度 $u_{4-}$	0.1		
	读数误差引入的标准不确定度 $u_{5-}$	0.3		

合成标准不确定度评定如式(3)所示。

$$u(\Delta_c)=\sqrt{c_{(\Delta_{+\max})}^2u_{(\Delta_{+\max})}^2+c_{(\Delta_{-\max})}^2u_{(\Delta_{-\max})}^2}=0.4\% \tag{3}$$

取包含因子  $K=2$ , 垂直线性误差校准结果的相对扩展不确定度如式(4)所示。

$$U_{\text{rel}}=K\times u(\Delta_c)=2\times 0.4\%=0.8\% \tag{4}$$

垂直线性误差扩展不确定度报告为:

$$U_{\text{rel}}=0.8\%, K=2 \tag{5}$$

根据 JJG 746—2004 标准, 超声检测系统垂直线性误差不大于 6%,  $U_{\text{rel}}$  应小于要求的三分之一, 故该校准装置满足设计要求。

3 结语

结合大型工业生产在线超声检测系统校准的实际要求, 设计研制了 SRIMNDT GX-1 新型超声检测系统校准装置。经与国内现有同类校准装置的性能比较及校准结果不确定度分析, 该校准装置基于优越的 FPGA 性能和先进的 DDS 技术, 将可校准的频率范围提高至 60 MHz, 频率准确度和稳定度也比现有装置提升 1~2 个量级。高度集成设计使得所研制的校准装置体积更小、质量更轻、便携性更好, 基本解决了现有超声探伤仪校准装置频带窄、体积大、现场校准不便等问题。该装置在技术上完全满足 JJG 746—2004 和 EN 12668-1:2010 等国内外

相关超声探伤仪计量检定规程、超声检测系统性能验证标准中相关参数的检定和校准要求, 更适用于工业现场超声检测系统的在线校准, 为大型在线超声检测系统正常可靠的工作提供了保障。

参考文献:

[1] 贺涛, 陈晓渊, 胡静. 超声探伤仪检定仪研制[J]. 声学技术, 2011, 30(4):199-203.

[2] 周正干, 李文涛, 李洋, 等. 相控阵超声水浸 C 扫描自动检测系统的研制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12):28-34.

[3] 贺涛, 唐薇薇, 刘夏茹. 超声探伤仪检定装置数字化研究[J]. 中国测试, 2014, 40(4):111-114.

[4] 孙景峰, 刘慧英, 舒蓉, 等. 可控超声探伤仪自动检定系统的研究与实现[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(7):1085-1091.

[5] 刘伟静, 刘丹, 韩强, 等. 基于 AD9910 的 70 MHz 中频信号源设计[J]. 空间电子技术, 2019, 13:68-71.

[6] 王硕, 马永奎, 高玉龙, 等. 基于 FPGA 的改进结构的 DDS 设计与实现[J]. 电子技术应用, 2016, 42(3):28-34.

[7] 王家敏, 杨青慧, 张怀武. 9 kHz~1.4 GHz 高精度快速随机跳频 DDS 频率合成器[J]. 电子科技, 2019, 32(12):27-31.

[8] 谭德勇, 陆聪, 杨维明, 等. 基于 DDS 技术的 LFM 信号产生与 FPGA 实现[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11):275-279.