Journal of Applied Acoustics

◇ 研究报告 ◇

超声检测中常用激励波形的高精度相控发射实现*

蔡明飞† 师芳芳 孔 超 张碧星

(中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 超声无损检测根据不同的检测需求使用不同的激励波形,而超声相控阵技术的应用则要求各通道的 激励波形能够相控发射。本文分析了不同检测对象、不同检测方法对激励信号的波形类型要求,研究了基于 FPGA 主控的数字式超声检测平台下实现单通道方波脉冲、尖脉冲、正弦波形和任意波形等的发射方法,以及 以上各种波形在多通道高精度相控发射时的实现方法。实验表明,各种波形的激励信号都实现了高精度相控 发射,最高可达1 ns 的延时精度。 关键词 超声检测,激励波形,波形类型,相控发射 中图分类号: TB51+7 文献标识码: B

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.06.008

文章编号: 1000-310X(2015)06-0526-07

High precision phased transmission of commonly used excitation waveforms in ultrasonic testing

CAI Mingfei SHI Fangfang KONG Chao ZHANG Bixing

(State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Excitation waveforms vary according to the testing requirements in ultrasonic nondestructive testing, and ultrasonic phased array technology demands the phased transmission of excitation waveforms among channels. Analyzed the wave type requirements of diverse testing specimens and methods, and studied the implementation of square-wave pulse, sharp pulse, sinusoidal wave and arbitrary wave of single channel in digital ultrasonic testing platform based on FPGA, as well as the method of high precision phased transmission of multiple channels of the waveforms above. Experiments show that all the excitation waveforms can be transmitted at the time resolution of 1 ns, respectively.

Key words Ultrasonic testing, Excitation waveform, Wave type, Phased transmission

²⁰¹⁵⁻⁰⁴⁻¹⁴ 收稿; 2015-04-25 定稿

^{*}国家自然科学基金项目(11174321, 11374324)

作者简介: 蔡明飞 (1987-), 男, 浙江湖州人, 博士研究生, 研究方向: 超声传播与成像。

[†]通讯作者 E-mail: caimingfei10@mails.ucas.ac.cn

1 引言

超声检测技术兼具适用性广、检测深度大和安 全性好等优点,是五大常规工业无损检测方法中应 用最广泛的一种^[1]。超声检测时,发射电路产生高 压激励信号加载到超声换能器产生发射声波,该声 波在被检件中传播,如果遇到缺陷会产生反射、散 射、透射等,反射、散射、透射波被超声换能器接收得 到检测信号,该检测信号携带了被检件内部的缺陷 信息,可通过分析得到检测结果^[2]。

由于被检件的类型繁多,缺陷种类多样,因此 在不同的检测应用中为了得到较易判断检测结果 的检测信号,需要选择不同类型的激励信号。最常 使用的激励信号是尖脉冲或方波脉冲,而在一些特 定的超声检测应用中,激励信号可能是正弦脉冲、调 频信号、非规则任意波形等的一种或几种^[3]。除了 激励信号的类型要求外,超声检测技术中相控阵技 术的发展对激励信号提出了通道数量、通道间延时 精度等方面的要求,多路激励信号遵循延时法则激 励阵列换能器的相应阵元发射声波,形成聚焦声场, 以进一步提高超声检测的灵敏度和信噪比等^[4]。

目前数字式超声检测技术已经普及,这类方案 中激励信号的产生大致可以分为两个步骤:首先是 主控模块产生低压触发信号,然后触发信号经过高 压放大模块产生高压激励信号。激励信号的波形类 型产生以及多通道时的通道间延时都是由主控模 块来实现的,主控模块一般是基于FPGA或CPLD 平台构成的^[5]。本文分析了超声检测中,几种典型 应用时的激励信号波形类型的要求,以及相控阵技 术中的延时精度要求,在此基础上,研究了在基于 FPGA平台下,波形类型为尖脉冲、方波脉冲、正弦 脉冲以及任意波形等的单通道和多通道相控发射 时激励波形的生成方法,并充分利用FPGA内资源, 实现了以上各种类型激励波形的高延时精度相控 发射。

2 激励信号的要求分析

2.1 波形类型要求

超声检测中常用的激励信号是尖脉冲或方波 脉冲:前者具有较大的带宽,适用于需要宽带窄脉冲 检测信号的情形;后者可以有效提高换能器灵敏度。 为了解决工程实践中微裂纹/微缺陷、复杂形 状零件等的检测,非线性超声检测技术逐步发展,该 技术常用激励信号与缺陷作用产生的谐波成分作 为检测信号,或者采用两列波调制得到的新频率的 信号作为检测信号,因此要求激励信号的频率单一, 同时具有足够的功率产生非线性效应,所以一般使 用单频正弦脉冲串来激励换能器^[6]。

超声波在介质中传播时,一方面衰减使得能量 减小,另一方面由于发散使得能量分散,造成了超声 检测中检测深度与检测分辨率的矛盾,为了解决这 一矛盾,研究人员发展了脉冲压缩技术,需要使用线 性调频信号、非线性调频信号等具有较大时间带宽 积的信号作为激励源^[7]。此外,在空气耦合超声检 测中,脉冲压缩方法也被采用以提高耦合信号的能 量,使用调频信号作为激励源^[8]。

适用于对管、杆、板等进行长距离大范围检测的超声导波检测宜选择频散小、容易分辨的模态,因此激励信号以频率、相位可控的窄带脉冲信号为宜, 一般使用时域加窗的正弦脉冲串^[9]。

此外在一些应用中,为了得到指定形状的检测 信号,通过自适应滤波方法求解获得对应的激励信 号^[10],这种激励信号一般也是非规则的任意波形。

2.2 延时精度要求

超声相控发射利用了声场的叠加原理,通过调整加载到各个阵元的电激励信号的时间延迟,从 而改变阵元发射声波到达被检件内某点时的相位 关系,实现焦点和声束方向的变化。一般的超声相 控阵检测中使用多通道的尖脉冲或方波脉冲作为 激励信号,而当非线性技术、脉冲压缩技术、导波 检测等与相控阵技术相结合时,相应的激励波形 也将变为多通道的正弦脉冲、调频信号或任意波形 等^[11-13]。

超声相控阵检测系统的声束延迟控制并不是 连续的,而是量化离散的,从而会产生相位控制误 差,导致误差旁瓣的产生,进而影响系统的对比度 分辨率。在换能器中心频率对应的周期 $T \gg 延迟$ $精度 \Delta\tau$ 的情况下,误差旁瓣与声束主瓣幅值之比 S与延迟精度 $\Delta\tau$ 近似成线性关系,如式(1)所示:

$$S = \left[\frac{1 - \operatorname{sinc}(\Delta \tau/T)}{N \operatorname{sinc}^2(\Delta \tau/T)}\right]^{1/2} \approx \frac{\pi \Delta \tau}{T(6N)^{1/2}}, \quad (1)$$

其中, N 为激励信号的通道数量。因此Δτ 数值越 小,误差旁瓣也将线性变小,系统的对比度分辨率 将得到提升。此外,系统的延迟精度还会直接影响 声束的偏转和聚焦控制。研究表明,以一维线阵为 例,焦点在纵向的分辨率 $\Delta F \propto \Delta \tau$,声束偏转分辨 率 $\Delta \theta \propto \Delta \tau$,从而延时精度越高,系统的空间分辨 率也将越高^[5]。

3 高精度相控发射的实现

3.1 尖脉冲和方波脉冲激励信号

尖脉冲和方波脉冲激励波形的触发信号一般 与FPGA引脚输出的信号数字电平标准一致,该信 号经过驱动芯片后驱动由分立的场效应管或集成 脉冲发生器为主要器件搭建的高压模块,从而产生 激励波形。多路相控发射时,不同通道的延时通过 FPGA内部逻辑编程实现,其引脚扇出的触发信号 携带延时信息,而不同通道高压模块则尽可能地在 电气参数上做到一致。

目前,大多数超声相控阵检测设备的发射延时 精度在10 ns左右,少数高精度的可以达到2.5 ns。 从FPGA的实现上来说,要实现10 ns的延时精度, 可以通过在100 MHz时钟下逻辑编程,通过整数周 期的延迟即可实现;要实现2.5 ns的延时精度,则在 400 MHz时钟下进行,一般的中高性能FPGA都支 持这一频率的逻辑运行。

当延时精度要求更高时,这种整数周期的延 迟方式将很难实现。本文实现的最高延时精度为 1 ns,而FPGA没有能够运行在1 GHz时钟下的, 因此需要调用特殊的资源来实现。在设计中,一个 触发信号在250 MHz时钟的内部逻辑中分为四股 数据流,在Xilinx公司的FPGA中通过调用引脚的 输出并串转换器(OSERDES)资源,将四股并行数 据在500 MHz引脚时钟下通过双倍数据率(DDR) 方式在单引脚上依次串行扇出,从而使得扇出的 触发信号可以以1 ns为时间单位变化高低电平。 表1为OSERDES 仿真用的两路延时起始时间和脉 冲宽度值, 仿真结果如图1所示, Emit p chn 为250 MHz的Clk Div逻辑时钟下根据延时值 解析得到的4路并行数据, Emit s chn为经OS-ERDES并串转换后在500 MHz的Clk DDR引脚 时钟下的1路DDR串行数据,可以看到发射起始信 号Emit Start有效上升沿到来后的延时值解析占 用18 ns (=128-110)的固定延迟, OSERDES 进行 并串转换延占用6 ns (=134-128)的固定延迟,整个 模块只有24 ns的延时,实时性良好。

一些集成脉冲发生器支持三电平、五电平的脉 冲激励波形产生,单个通道需要多个满足特定控制 时序的触发信号,而FPGA强大的并行计算能力使 得其适合这样的设计。

表1 两通道延时参数值 Table 1 Delay parameters for 2 channels

通道	起始时间 (ns)	脉冲宽度 (ns)
0	6	21
1	7	22



图1 1 ns 延时精度触发信号仿真

Fig. 1 Simulation of 1 ns time delay resolution triggering signals

第34卷第6期

3.2 正弦波形激励信号

正弦波形的激励信号由正弦波形的低压触发 信号经过高压宽带放大器或宽带射频变压器变换 到要求的幅度,放大器或变压器的带宽应包含超声 换能器的带宽,且具有足够的驱动能力,这是触发信 号无损放大的基本条件。

脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)技术是产生正弦波形的常用方法之一,如 文献[14],超声专用的波束形成源驱动器通过接收 PWM逻辑信号,转换后输出幅度可调制的正弦信 号,同时接收通过SPI协议写入的每次发射前可更 新的整体幅度与相位信息,而FPGA逻辑负责产生 所需波形的PWM 信号以及符合协议的幅度、相位 信息并发送给驱动器,不过这种方式下延时精度受 驱动器的时间分辨率参数限制,文献[14]中最高为 3 ns。

为了实现更高精度的延时控制,本文采用了 直接数字合成 (Direct digital synthesis, DDS) 技术 来产生正弦信号,该技术具有相位变换连续、频率 稳定、集成度高及控制灵活等多种优点^[15]。DDS 技术通过相位累加原理直接合成所需的波形,典 型的DDS模型由相位累加器、加法器、波形存储 器、数字-模拟转换器 (Digtal to analog converter, DAC)和低通滤波器组成,如图2所示。其中前两 个模块负责数字波形的产生,后两个模块负责将数 字波形转变为模拟波形。典型的DDS集成芯片只 需要接收频率控制字K 和相位控制字P 等即可输 出相应的模拟波形,具体来说是从一张2^M个数据 的单周期正弦表中从第P个数开始、每K个数取 一个得到数字波形放入波形存储器再进行数字-模 拟转换及滤波。而在FPGA 平台下,更经济的做 法是在FPGA内部例化数字波形产生的逻辑模块, 通过引脚直接扇出数字波形到外加的DAC 进行 数模转换。



图 2 DDS 原理框图 Fig. 2 DDS block diagram

DDS方式合成的正弦波频率由频率控制字*K* 决定,为

$$f_0 = \frac{K f_c}{2^M},\tag{2}$$

其中, f_c 为参考时钟频率,也等于 DAC 的采样频率, M 为数据位宽,设定 DAC 的位宽也等于 M。奈奎 斯特采样定律决定了 $K \leq 2^{M-1}$,而为了最后合成 的模拟波形稳定起见,K取 2^M 的 $1/10 \sim 1/5$ 为宜。 由此,对于超声无损检测常用的 500 kHz ~ 20 MHz 频率范围,100 MSPS 的 DAC 采样率将满足要求。

虽然通过FPGA 引脚扇出的每个正弦波形是 以DAC采样率来数字化的,但波形的相位分辨率由 相位控制字 P 决定, P 为整数,因此相位分辨率和对 应的延时精度分别如式 (3) 和式 (4) 所示:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{2^M},\tag{3}$$

$$\Delta \tau = \frac{\Delta \phi}{2\pi} T = \frac{1}{2^M f_0},\tag{4}$$

其中, T 为信号周期。当M = 12时, 对于500 kHz 的波形频率, 延时精度 $\Delta \tau = 1/(2^{12} \times 500$ kHz) ≈ 0.5 ns, 且频率越高, $\Delta \tau$ 越小。因此, 相控发射多路 正弦波形时, ns级的延时精度可通过相位控制字P来实现。具体地, 在 FPGA内, 控制逻辑调用每个通 道的延时值, 将其划分为粗延时和精延时, 其中前者 由采样时钟经过整数周期的延时完成, 而后者则通 过数值计算得到对应的P并写入到DDS逻辑模块, 从而实现精确的延时控制。

如超声导波检测等,激励波形往往是加窗的多 周期正弦波形,相应的触发信号也是如此,只在幅度 上有所差别。使用 DDS 技术产生这种触发信号需 要对其基本模型进行改进,即在数据从波形存储器 发送到 DAC 之前,对每个数字波形值乘以数字化的 窗函数值,完成幅度加权。这一操作在 FPGA 内完 成,数字化的窗函数值需要预先存在 FPGA 的存储 资源内,以便高速实时调用。

3.3 任意波形激励信号

目前,大多数超声相控阵检测仪只支持脉冲形 式的激励波形发射,少数可支持正弦信号的激励波 形发射,而任意波形的激励发射则少有实现。事实 上,正弦波形可以认为是任意波形的一种特例,它们 都是低压的触发信号经过放大器或变压器从而实 现幅度变换,产生高压激励输出;不同的是正弦波形 频率单一、相位连续,易于使用DDS技术通过频率、 相位等参数控制波形,而一般的任意波形则频率、 相位、幅度等参数的一个或几个在一定范围内变化, 在这种情况下通过频率、相位等参数来控制波形将 变得不够高效。

与DDS技术通过相位累加器和加法器等产生 正弦波形不同的是,本文中任意波的数字波形产生 不在FPGA内执行,而是外部数字化完成后导入至 FPGA内丰富的存储资源中,存储资源则相当于波 形存储器,其后的数字波形到模拟波形的转换则与 DDS技术实现时一致。

上节中通道间延时精度比DAC采样频率对应 的周期要高是因为完整的数据表是以 2^{M} fo的频率 来数字化的,而由于正弦波是周期重复的,因此存 储一个周期的数据也可以支持多周期的发射。一般 的任意波形则多不具备周期重复的特点,从而需要 按照激励波形的时宽长度来完整存储波形数据。波 形数字化频率比DAC采样频率高以追求高延时精 度的方法仍旧适用,但鉴于FPGA内存储资源的限 制以及实际检测的精度要求,对波形的数字化频率 需综合考量。目前,中高性能FPGA 内存储资源一 般在数Mb~数十Mb之间,以单片FPGA控制16 个通道的任意波形发射为例,每个波形时长10 us, 按1 ns的精度量化为12位数据,则至少需要占用 $16 \times 10 \text{ } \mu\text{s}/1 \text{ } \text{ns} \times 12 \text{ } \text{bits} = 1920000 \text{ } \text{b} \approx 1.831 \text{ } \text{Mb}$ 的存储空间;10 µs长度等于100个周期的10 MHz 中心频率的信号,1 ns精度则相当于1%的信号周 期。需要发射更长的激励信号时,往往信号的频率 会较低,由式(1)可知,对延时精度的要求也会相应 降低,因此这一存储空间也能满足时宽更长的激励 波形发射要求,从而使得系统能够满足大多数的检 测要求。

在波形发射时,与DDS技术一样,通过采样时 钟的整数倍延迟实现粗延时,通过调用不同的数 据起始点并间隔取数来实现精延时,间隔量相当于 DDS中的*K*,这一方法可以使得DAC的采样率降 低到延时精度对应频率的1/*K*,代价是FPGA必须 具备足够的存储资源。

4 测试结果

4.1 触发信号测试

本文采用型号为XC5VSX95T的FPGA,通过 硬件编程在250 MHz逻辑时钟+500 MHz引脚时 钟的组合下实现了1 ns延时精度的脉冲触发信号, 图3为经过电平转换后的两个通道的触发信号,由 于1 ns 延时相对图3(a) 中显示的总时间长度来说 过小,因此难以分辨两路波形,展开后如图3(b) 所 示可以分辨出两通道间约1 ns 的延时。





通过 FPGA 内部硬件编程以及对 DDS 软核的 调用,并经过 DAC 的数字波形到模拟波形的转换, 实现了1 ns 延时精度的正弦波形触发信号的产生, 图4为由汉宁窗进行幅度调制的10周期正弦信号, 信号频率为10 MHz。图4(a)中,1 ns 延时相对总时 间长度过小,展开后在图4(b)中,以两路波形的过 零点作为延时衡量,可见延时为1.00 ns,误差为0%。

通过FPGA内部波形数据的预存储及硬件编 程,并经过DAC的数字波形到模拟波形的转换,实 现了最高1 ns延时精度、最长10 μs时宽的任意波 形触发信号的产生,图5为起始频率为2 MHz、截 止频率为8 MHz的线性调频正弦波,两路波形形 状一致是为了便于分辨1 ns的延时。其中,图5(a) 为触发信号外部数字化后的数据画图结果,图5(b) 为示波器采集到的两通道触发信号,局部展开后如 图5(c)所示,可见两通道实测延时差为1.13 ns,误 差为13%。





Fig. 4 Testing of 2 channels windowed sinusoidal-wave triggering signals at the delay interval of 1 ns





降低延时精度到2 ns,则可实现最长20 μs时 宽的任意波形触发信号的产生,图6为起始频率为 1 MHz、截止频率为5 MHz的线性调频正弦波。其 中,图6(a)为触发信号外部数字化后的数据画图结 果,图6(b)为示波器采集到的两通道触发信号,局 部展开后如图6(c)所示,可见两通道实测延时差为 1.95 ns,误差为-2.5%。



图 6 20 µs 时宽的线性调频信号数据产生与波形实测 Fig. 6 Data generation and waveform testing of 20 µs-width linear frequency modulation signals

4.2 激励信号测试

将上节中10 μs 时宽、1 ns 延时精度的两路线 性调频信号输入到定制的高压线性放大模块,得到 输出为两路幅值在±20 V以内的线性调频激励波 形,如图7(a),展开来如图7(b)所示,经放大后得到 的激励信号两通道间的延迟为1.15 ns,误差为15%, 延时精度特性得到了保持。





Fig. 7 Testing of 10 μs -width linear frequency modulation excitation signals

5 结论

本文在对不同激励波形类型要求和通道间延时精度需求的分析基础上,研究了方波脉冲、尖脉冲、正弦信号和任意波形等的单通道发射及多通道 高精度相控发射实现方法。

通过FPGA逻辑编程及对引脚专属资源的充 分利用,实现了脉冲触发信号的产生,通道间延时精 度和脉冲宽度的调节精度可达到1 ns。通过FPGA 逻辑编程及调用内部 DDS 软核,辅以 DAC 的数模 转换等,实现了幅度调制正弦触发信号的产生,信 号长度不受限制,通道间延时精度设定为1 ns;使用 FPGA 内的存储资源来替代 DDS 软核,实现了线性 调频触发信号的产生,最高延时精度为1 ns,信号 长度为10 μs,也可通过牺牲延时精度来实现信号 长度的增加。幅度调制正弦触发信号和线性调频触 发信号经过高压线性放大模块后,相应的激励信号 延时精度特性得到保持,能够达到设计指标,为开 展超声相控阵检测的应用研究与前沿探索奠定了 基础。

参考文献

 [1] 黎连修. 超声检测技术在中国——庆祝中国机械工程学 会无损检测分会成立三十周年[J]. 无损检测, 2008, 30(4): 197-200.

LI Lianxiu. Review and expectation of ultrasonic testing technique——Celebration of 30 year anniversary of ChSNDT[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(4): 197–200.

- [2] 中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测 [M]. 2版. 北 京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 安艳芳,冷涛,王小民.典型激励信号对换能器瞬态特性的影响研究[C].2014年全国声学学术会议,2014.
- [4] Olympus NDT, Advances in phased array ultrasonic technology applications[C]. Olympus NDT, 48 Woerd Avenue, Waltham, MA 02453, USA, 2007.
- [5] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [6] 刘斯明, 彭地, 赵翰学, 等. SiC_p 颗粒增强铝基复合材料非 共线非线性响应试验观察 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 21-26.

LIU Siming, PENG Di, ZHAO Hanxue, et al. Experimental observation of nonlinear response of SiC_p aluminummatrix composites using non-collinear technique[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 21–26.

- [7] 焦敬品,马婷,刘德宇,等. 基于脉冲压缩技术的相邻缺陷识别方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1614–1621. JIAO Jingpin, MA Ting, LIU Deyu, et al. Study on identification method of adjacent defects using pulse compression technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1614–1621.
- [8] 周正干,魏东,向上.线性调频脉冲压缩方法在空气耦合超声 检测中的应用研究[J].机械工程学报,2010,46(18):24-28, 35.

ZHOU Zhenggan, WEI Dong, XIANG Shang, et al. Application of linear-frequency-modulation based pulse compression in air-coupled ultrasonic testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 24–28, 35.

- [9] 周进节. 基于时间反转方法的超声导波检测设备研制及其应 用研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [10] 张晗,李明轩,毛捷,等.可产生"任意"超声检测信号的方法[J].声学学报,2009,34(6):539-547.
 ZHANG Han, LI Mingxuan, MAO Jie, et al. Method to produce 'arbitrary' ultrasonic testing signals[J]. Acta Acoustica, 2009, 34(6):539-547.
 [11] 高鹏,李法新.非线性超声相控阵无损检测系统及实验研究

 [J]. 实验力学, 2014, 29(1): 1–11.
 GAO Peng, LI Faxin. Nonlinear ultrasonic phased array nondestructive testing: system and performance study[J].
 Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1): 1–11.

- [12] 李长征. 基于编码激发和脉冲压缩的超声多频相控阵成像方 法研究 [D]. 北京: 中国科学院声学研究所, 2013.
- [13] 谢馥励. 声表面波聚焦与检测研究 [D]. 北京: 中国科学院声 学研究所, 2012.
- [14] Supertex Inc. MD2131 ultrasound beamforming transmitter demoboard[EB/OL]. [2015-05-08]. http://ww1. microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MD2131DB1% 20A070114.pdf.
- [15] 鲍晓宇,施克仁,陈以方,等.超声相控阵系统中高精度相 控发射的实现[J].清华大学学报:自然科学版,2004,44(2): 153-156.

BAO Xiaoyu, SHI Keren, CHEN Yifang, et al. Highprecision phased ultrasonic transmission in phased array ultrasonic systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(2): 153–156.