

基于 FPGA 的超声相控阵波束合成技术

杨天雪,徐春广,李 爽

(北京理工大学 机械与车辆工程学院,北京 100081)

摘要:数字波束合成技术是相控阵超声检测相对于其它超声检测所特有的,也是整个信号接收处理系统的核心技术。通过设计基于可编程现场门阵列(FPGA)的各个模块,充分利用FPGA的优点,实现了精确延时和快速加权求和。从而可以对回波信号在不同方向和深度进行动态聚焦,很好地实现了波束的数字合成。

关键词:超声相控阵技术;数字波束合成;可编程现场门阵列

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2008)11-0813-03

Digital Beam Forming for Ultrasonic Phased Array Based on FPGA

YANG Tian-Xue, XU Chun-Guang, LI Shuang

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Digital beam forming (DBF) is special for phased array ultrasonic transducer compared to other ultrasonic nondestructive testing and is also the kernel technology of the whole signal-receiving system. By the merits of field programmable gate array (FPGA), exact time-delay and fast adding of signals multiplied by weighting factors were achieved through modules based FPGA. Dynamic focusing of received signals in different directions and depths was also achieved. Good DBF was realized.

Keywords: Ultrasonic phased array; Digital beam forming; Field programmable gate array

数字波束合成技术(简称DBF)是近二三十年发展起来的阵列信号处理技术,最先应用于相控阵雷达的信号处理。DBF具有快速自适应波束置零、超分辨定向、超低副瓣、阵元失效波束校正、密集多波束、自适应空时处理和灵活的时间控制等优点,是现代阵列信号系统必须采用的关键技术。

相控阵无损检测是最近发展起来的一种无损检测方法。它采用电子方法控制声束聚焦和扫描,可以在不移动或少移动探头的情况下进行快速扫查;具有良好的声束可达性,能对复杂几何形状的工件及其盲区缺陷进行检测;通过优化控制焦点尺寸、焦点深度和声束方向,可使检测分辨力、信噪比和灵敏度等性能得到提高,检测图像更加清晰,检测速度更快。超声相控阵数字波束合成器是相控阵无损检测

信号接收处理部分的核心,是基于DBF原理,通过对多路数字超声信号的延时合成,实现对回波信号在不同方向和不同深度聚焦的技术。

超声回波信号通过多个通道接收,由于接收通道中阵元的位置不同,造成同一点的回波信号到达的时间延迟不同。数字波束合成器的任务就是通过对不同通道的回波信号进行延时,使同一点的回波信号在波束合成器中同相相加,增加回波信号的信噪比,此为接收聚焦。而接收焦点随深度变化,从而使延迟时间随深度动态变化,称为动态聚焦。对多个通道的回波信号进行空域上的加窗,可起到匹配滤波的效果,提高回波数据的信噪比,在波束合成器中称为加权变迹^[1]。

1 数字波束合成器在FPGA中的实现

相控阵信号接收的数据速率很高,所以计算量相当大,用一般的DSP在一个采样样本的时间间隔内很难实时完成,而且把高速多路的数据流送入

收稿日期:2007-11-13

作者简介:杨天雪(1978-),男,博士研究生,研究方向为无损检测。

DSP 中十分困难。采用 FPGA 可以利用其多 IPO 脚灵活配置,接收多路数据,数据运算在同一个接收时钟的控制下流水线完成,只要控制每一级流水线的运算时间小于一个样本的采样时间,即可满足计算速度要求。数字波束合成器的功能框图如图 1。

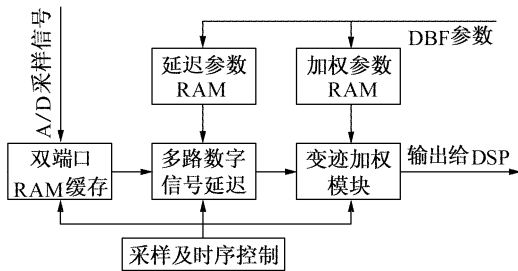


图 1 数字波束合成器功能框图

每一路超声回波信号经过信号调理电路及 A/D 转换后,首先进入缓存,在采样及时序控制模块和延迟参数的控制下,延迟一定的时间,从数据缓存中读出;经过数字延迟的多路信号输出给变迹加权模块,按照算法进行波束合成,各路信号的加权系数来自加权参数 RAM;合成的回波信号输出给 DSP,进行波形信号后处理及成像和判伤等。

1.1 信号延迟模块

信号延迟模块包括双端口 RAM 和延迟时钟控制模块 ClkCtrl 两部分,模块原理见图 2。输入量为时钟 CLK,复位信号 RB、延迟控制量 DTIME [9:0]、A/D 采样信号 DATA[11:0];输出为延迟数字信号 DLYData[11:0]。

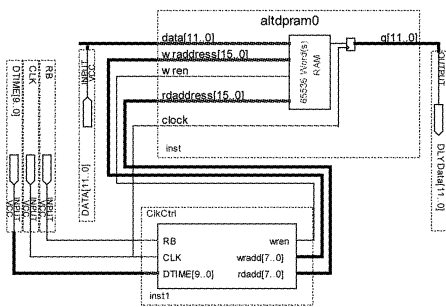


图 2 信号延迟模块

由 A/D 采样的数字信号要经过数据缓存,再交给信号处理模块处理。每个接收通道提供 65 k 点的缓存深度,在 A/D 采样速度为 40 MSPS 时,采样时间长度约为 1.6 ms,相当于在铝($c_1 = 6\,230\text{ m/s}$)中 10 m 的声

程,满足检测深度的需要。

设计中采用双端口 RAM 作为数据缓存模块,设计采用 FPGA 开发环境 Quartus II 5.1 自带 MegaWizard Plug-in Manager 工具例化的宏功能模块。双端口 RAM 模块如图 2 所示。DPRAM 模块中,12bits 输入 data[11:0]与 12 位 A/D 相匹配,作为数据,该模块还提供 8 位的读地址和写地址,读、写时钟分开,并且有写操作使能信号 wren,对其进行控制可实现延时采样锁存。

多通道超声回波信号的接收延时和动态聚焦是超声系统特有的,对于不同通道进行不同的延时,可以实现对回波信号进行不同位置和不同深度的聚焦。接收延时的实现是通过控制 A/D 采样时钟来实现的。

信号延迟模块的实现是基于计数器,在该模块内部建立一个时钟计数器,当复位信号 RB 下降沿到来时,计数器启动,同时 wren 信号上拉为高电平,启动双端口 RAM,在时钟 CLK 的控制下,延迟模块给双端口 RAM 发送随 CLK 递增的写地址 wradd,但是读地址 rdadd 始终保持为 0,这样,读出的数据为静态值;计数器的计数值为延迟量 DTIME[9:0],当计数器计数值达到延迟控制量时,读地址开始自增,读出的信号是 DTIME 个时钟周期之前采集的。整个过程相当于将回波信号延迟了 DTIME 个时钟周期。最小延迟量为一个时钟周期。该模块在 QuartusII 中的仿真结果如图 3 所示。

该仿真的时钟 CLK 为 100 MHz,DTIME 延迟量设为 10 个时钟周期。仿真结果与设计思想相符。

1.2 加权求和模块

加权求和模块的功能是将经过延迟的多路数字信号合成,该功能的实现分为加权及求和两部分。加权是将各路信号与相对应的权值相乘,作用是分配单路信号在整个合成波束中的权重;求和模块负责将多路信号相加成为单路信号,交由 DSP 处理。加权模块和求和模块均采用 QuartusII 中提供的 MegaWizard Plug-in Manager 工具例化的宏功能模

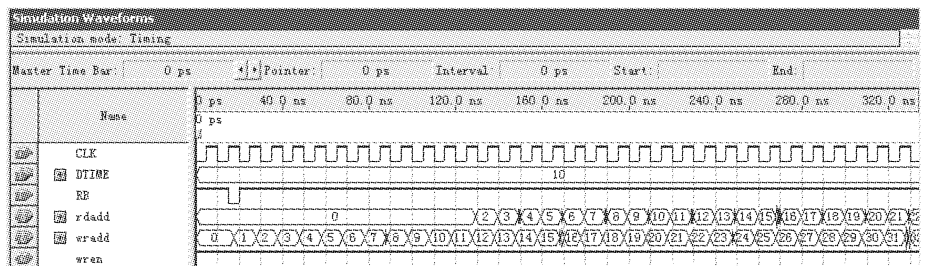


图 3 延迟模块时序仿真结果

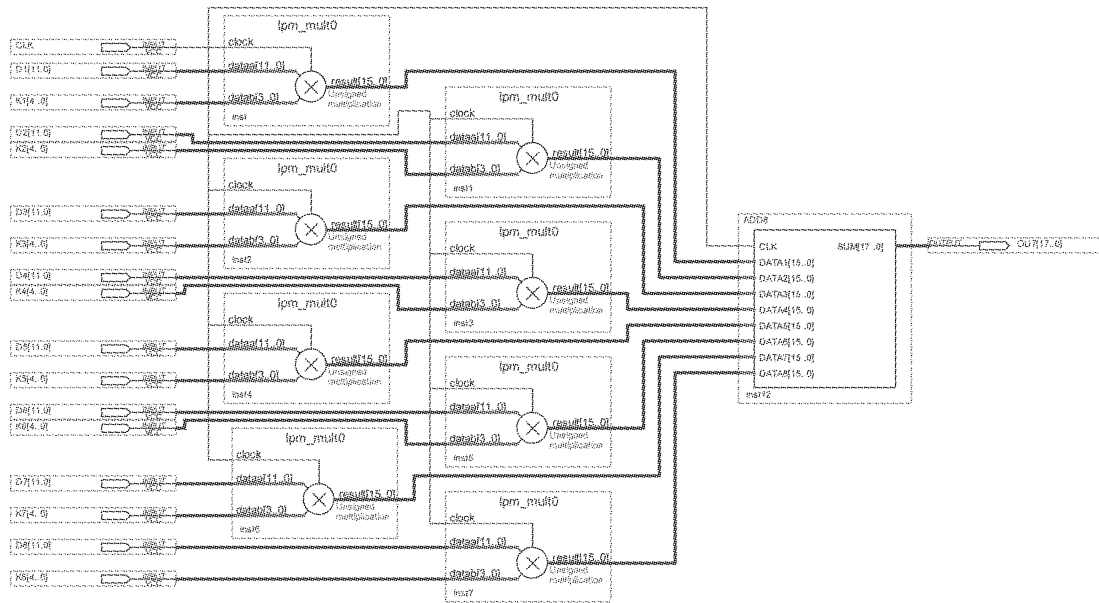


图 4 8路加权求和模块

块。设计实现了八路信号的加权求和,模块原理如图 4。

加权系数 $K_1 \sim K_8$ 来自加权参数 RAM,是一组 4 bits 控制量。该控制量的大小决定了某路采集信号在整个波束中的权重。通过合理的算法生成的加权系数可以使合成波束的指向性更好,从而提高检测质量。

2 试验

使用基于 FPGA 的波束合成系统进行探伤试验。试验示意图见图 5。

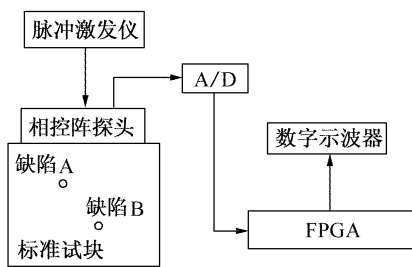


图 5 试验结构图

试验信号的激发与接收换能器采用 R/D Tech 公司的 60 阵元 7.5 MHz 超声相控阵探头,探头的第一阵元中心位置在试块上标示出来。试块为符合 GB/T 18852—2002 标准^[2]的无损检测用试块。该试块由山东济宁模具厂制造,材料为碳素钢,声速 $c_1 = 5900 \text{ m/s}$,尺寸见图 6。探头与试块表面采用甲基硅油耦合。对缺陷 A 进行波束合成聚焦,所得波形见图 7。

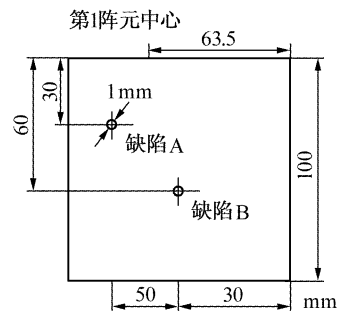


图 6 标准试块尺寸

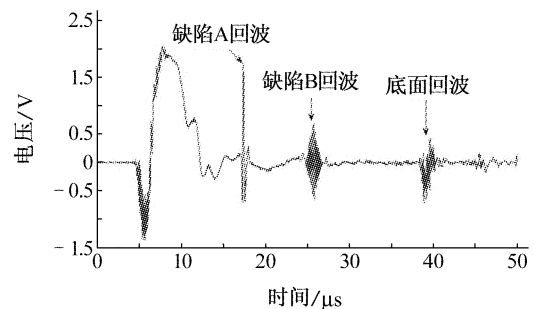


图 7 缺陷 A 波束合成电压波形

采取上述措施以后,缺陷 A 的回波大大增强,缺陷 B 和底面回波则有所减弱,从而更加容易检测到缺陷 A 回波。

3 结语

波束合成器是超声相控阵信号接收系统的核心部分,也是整个无损检测系统的核心。波束合成器的质量将直接影响缺陷的检测。试验结果可见,设

(下转第 819 页)

由于镍基焊缝具有比母材更大的射线吸收系数(衰减系数),因此底片可以清晰地反映焊缝的横截面形状,缺陷影像非常清晰。超声检测时,从其上表面左侧测得反射波信噪比 >12 dB,反射波幅为 $SL-0.6$ dB;从下表面右侧测得其反射波信噪比 >20 dB,反射波幅为 $SL+13.9$ dB。

4.2 裂纹

在制作的 E1002 超声焊缝试块靠近上表面处发现一缺陷反射波,通过渗透和目视检测确认其为一深度 13 mm 的表面开口裂纹(图 5 左上角处)。其超声检测最高反射波信噪比 >20 dB,反射波幅为 $SL+13.1$ dB。

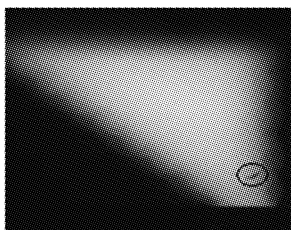


图 4 E1001 焊缝试块
射线底片

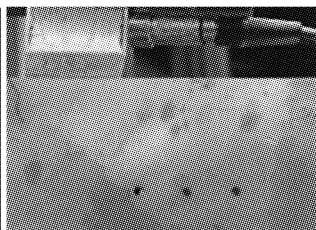


图 5 E1002 焊缝
试块图

4.3 E1001 材质试块的超声检测

对 E1001 材质试块进行超声检测,共发现七处缺陷,其中 1~4 号缺陷与 RT 底片部位重合,7 号缺陷不超标。1~3 号缺陷为裂纹和条状夹渣,根据超声检测结果返修,返修后经 RT 复检缺陷已消除。4 号部位未能返修出底片所显示的体积型缺陷,RT 复检缺陷仍然存在,UT 再次检测原部位已无反射波;根部的反射波由于奥氏体焊缝的特殊性,定位存在误差,不敢轻易判定;通过两次 RT,利用几何关系估算,才大致确定了缺陷的位置;经返修,缺陷靠近内表面,为内部堆焊层未熔合。5,6 号缺陷复评底片显示无任何缺陷影像,PT 检测 5,6 号缺陷附近部位有点状和线性显示,但与超声部位不重合,超声检测初步判定为裂纹,该结论在返修时得到确认。

4.4 E1002 材质试块的超声检测

RT 发现存在条渣,UT 复核可以检测到,但从

两侧检测其深度有误差,一侧显示深度为 30.8 mm,另一侧为 36.7 mm,波幅均为 II 区。

5 结语

(1) 检测大厚度异种钢奥氏体焊缝时,推荐使用射线和超声检测方法相互补充。因为 ENiCrMo-3 焊材焊接的焊缝在焊接工艺掌握不好时容易产生微裂纹,并使弯曲试验不合格。若该微裂纹扩展到 $1/2\lambda$ (约为 1.2mm)以上时,超声检测相对容易发现,且在实际检测中得到了证实,而射线方法却无能为力。射线方法能检测到靠近底面的坡口未熔合,超声检测无法判定。

(2) 推荐以纵波 2.5 MHz、双晶、K1 和窄脉冲探头检测为主,视检测厚度需要,也可采用其它角度和型式的探头作为配合。实际应用证明,在检测近表面缺陷时,有必要使用小晶片双晶探头。

(3) 试块采用与产品相同的工艺制作,人工反射体选用 $\phi 2$ mm \times 30 mm 的横通孔。

(4) 可以参照 JB/T 4730.3—2005 标准中钢对接焊缝的检测灵敏度要求。必须保证检测时的噪声不大于荧光屏满刻度的 20%。为防止危险性缺陷的漏检,应根据在产品试块上的试验结果,选择反射波幅尽量低的孔为参考线进行检测,即采用较高的灵敏度进行检测。

实际试验表明,由于粗大晶粒产生的噪声影响,检测灵敏度的确有所下降,但此类焊缝的超声检测仍是基本可行的,具有较大的现实意义。

注:试验编制的专用检测工艺已通过了全国锅炉压力容器标准化技术委员会专家组的评审,并形成了备案。

参考文献:

- [1] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会. 超声波探伤[M]. 北京:中国锅炉压力容器安全杂志社, 1995.
- [2] 李 衍. 不锈钢焊缝的超声检测——现状与进展[J]. 无损探伤, 2005, 29(3): 1—6.
- [3] 郑中兴. 加氢裂化装置主管道不锈钢焊缝的超声探伤[J]. 无损探伤, 2001, 25(3): 5—6.

参考文献:

- [1] 袁海杰. 相控阵天线数字波束形成浅述[J]. 火控雷达技术, 2003, 12(32): 31—36.
- [2] GB/T 18852—2002 无损检测超声检验测量接触探头声束特性的参考试块和方法[S].

(上接第 815 页)

计的基于 FPGA 的八路数字波束合成器可很好地通过延时进行波束的聚焦和偏转,实现了良好的接收效果,可以检测出缺陷,满足了波束合成的技术要求,为多路超声收发试验提供了硬件基础。