DOI:10. 13382/j. jemi. B2205293

手持式超声多通道系统设计与导波成像技术研究

吕 灿 陈世利 刘 洋 张明崴 褚国安 童君开

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘 要:超小型手持式的多通道阵列系统是集成度非常高的超声检测系统,该系统主要优势是体积较小,检测方便等。针对超 小型手持式多通道阵列系统设计,搭建了 64 通道的超声检测系统,而 64 通道的超声检测系统设计结果为延时精度 5 ns 和采样 频率 100 MHz,系统的带宽为 0.02~25 MHz,系统体积为 40×70×90 mm³;通过延时精度和同步采样实验以及最后的缺陷检测 与导波成像实验,结果表明该系统设计的可行,对于扩展成更多通道的医学超声检测系统,该系统仍可以满足且体积不会增加 太多,在同类型仪器中体积较小。

关键词:超声导波成像;超声相控阵;超小型;多阵列;高精度 中图分类号:TH878;TB517 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:140.20

Design of hand-held multi-channel ultrasonic system and applications to ultrasonic guided wave imaging

Lyu Can Chen Shili Liu Yang Zhang Mingwei Chu Guoan Tong Junkai

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Ultra-small hand-held multi-channel ultrasonic system is a highly integrated system. This system has some advantages in nondestructive testing. Such as the size of the system is small, the detection with the system is convenient and so on. As for the design of this system, the 64-channel ultrasonic detection system in this paper is established. The consequence of ultrasonic detection system design is delay precision as 5 ns, sampling frequency as 100 MHz, bandwidth as $0.02 \sim 25$ MHz, volume as $40 \times 70 \times 90$ mm³. According to the results of the delay precision experiment, Synchronous sampling experiment, defect detection experiment and guided wave imaging experiment, the design dose work. The system can expand to more channels for application to medical ultrasonic detection and the volume will not increase too much. Meanwhile, its size is relatively small among the same type instruments.

Keywords: ultrasonic guided wave imaging; ultrasonic phased array; ultra-small; multi-channel; high precision

0 引 言

随着科学技术的发展,仪器与设备逐渐向小而精的 方向发展,区别于传统超声设备大而复杂的特点。同时 市场上对于小巧,快速的超声相控阵设备的需求,刺激了 该类型设备的研发。在国外,研发的一些小型便携式超 声相控阵检测仪器已经商业化,比如 Olympus 公司的 Tomo scan 以及法国 M2M 公司的 Mutil2000^[1];国内对于 该类型设备的研发还处于发展阶段,但是其应用的前景 非常宽广。同时国内外现在超声相控阵的研究方向主要 集中在各种不同的检测对象上,比如孙小磊等^[2]研究的 小管径不锈钢超声相控阵检测,李秀峰等^[3]研究的碳纤 维复合材料超声相控阵检测,宋晓峰等^[4]研究的钢结构 超声相控阵检测,Zhang 等^[5]研究的混泥土结构内部缺 陷超声相控阵检测以及黄海鸿等^[6]研究的关于零件表面 损伤对承载能力影响的超声相控阵检测,刘婧等^[7]研究 的超声 T 型焊缝检测等,说明现在超声相控阵系统的研 究基本成熟^[8],但是关于相控阵算法仿真、相控阵系统和 超声相控阵探头的研究也有不少,比如章东等^[8]研究的 等高度聚焦算法,该算法在聚焦区域外的检测效果较差, 但在聚焦区域内的检测分辨率较高。贾乐成等^[9]研究的 加速算法,该算法可以有效的减少成像时间,而且结合校 正模型,可以提高信噪比。金士杰等^[10]研究的基于全模

收稿日期: 2022-03-23 Received Date: 2022-03-23

(3)

式全聚焦的超声成像方法,该方法需要选择合适的超声 探头和检测位置才能有较好的成像质量。宋寿鹏等^[11] 研究的全矩阵超声成像换能器设计与声场仿真,提出了 不同于相控阵阵列的新型全矩阵超声换能器,检测效果 优于相控阵换能器。兰晓峰等^[12]研制的重载铁路钢轨 相控阵探伤系统可以实现智能判伤、实时报警、三维直观 化显示等功能。敬博通等^[13]研究的6种不同形状的阵 元的聚焦的能量分布和声场指向性,发现平面圆形阵元 能够平衡声场的低旁瓣干扰和具有高指向性。祁小凤 等^[14]研究出了128通道超声相控阵系统,并指出国内研 究成功的不多。金雷^[15]通过实验研磨制备不同上下微 观表面形貌的晶体,对探头的法向刚度以及灵敏度都有 影响。杨晓霞^[16]的超声关键技术的研究与孙芳^[17]的超 声关键问题的研究指出超声相控阵正在向着智能化,图 像化.数字化的方向发展。

本文采用的是高度集成的发射芯片与采集芯片来搭 建一个 64 通道的超声检测系统,该系统既可以用于相控 阵超声检测,也可以应用于导波成像实验,对于更多通道 数的医学超声检测需求,该系统仍然能满足,能够确保进 一步扩展的同时体积不会增加太多。该系统的难点在于 如何使各个芯片独立且正常的联调工作,希望给其他设 计超声检测系统的人提供一些帮助。

1 超声成像原理

超声导波层析成像是依据兰姆波的频散特性对缺陷 进行成像,当导波在板材中传播时,遇到板厚发生变化的 缺陷时,会发生反射,折射与模态转换,它所携带的能量 与传播速度都会发生变化,可以根据这些物理量的变化 来表征缺陷。而导波层析成像需要多角度的扫描才能全 面获取成像区域的信息,因此导波层析成像通常会采用 环形传感器阵列来获取全面的成像信息,最常用于层析 成像的导波信息有走时信息和幅值信息。其中走时信息 是指导波在遇到缺陷时速度发生变化,导致传播的时间 发生变化,从而获得走时差信息。幅值信息是指导波会 随着传播路径增加以及遇到缺陷而产生衰减,可以将有 无缺陷的回波幅值作差从而提取出缺陷的信息^[18]。

本文用到了4种超声导波层析成像方法,分别是信 号相关系数,信号衰减系数,最大峰以及波速变化。超声 导波层析成像的理论基础是缺陷概率重建算法 (probability reconstruction algorithm, PRA)。在所用的4 种层析成像方法中,信号相关系数方法通过如下方式计 算无缺陷时的基准信号与在役工件的缺陷信号之间的信 号差系数(signal difference coefficient, SDC)。

$$\rho_{SCC} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \tag{1}$$

$$A_{SDC} = 1 - \rho_{SCC} \tag{2}$$

式中: ρ_{scc} 为信号相关系数, A_{soc} 为信号差系数。Cov(X, Y) 为基准信号和缺陷信号之间的协方差, σ_x 和 σ_y 为基 准信号和缺陷信号之间的标准差。类似的, 信号衰减系 数, 最大峰以及波速变化可以用同样的方式来计算 SDC。 在算法的第2步重建过程中, 椭圆算法被用于计算每一 对发射和接收传感器之间的权重:

$$w_{ij}(x,y) = \begin{cases} (\beta - R_{ij}(x,y))/(\beta - 1), \ R_{ij}(x,y) < \beta \\ 0, \ R_{ij}(x,y) \ge \beta \end{cases}$$

式中.

$$\frac{R_{ij}(x,y) =}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}}{\sqrt{(x_i-x_j)^2 + (y_i-y_j)^2}}$$
(4)

其中,*i*为发射传感器的序号,*j*为接收传感器的序 号, $w_{ij}(x,y)$ 为该发射与接收传感器对的权重,(x,y)为 待成像点的坐标。 (x_i,y_i) 为发射传感器的位置坐标, (x_j,y_j) 为接收传感器的位置坐标, β 为标定因子,用于 控制成像区域的大小,在实验中设定为1.02。在算法的 第3步,采用将每一对发射和接收传感器组合的权重进 行线性叠加的方式计算待成像点(x,y)的权重:

$$P(x,y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} P_{ij}(x,y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} w_{ij}(x,y) \bar{A}_{ij}$$
(5)

在成像过程中,所用的传感器总数为 N,平均信号差 系数 A_i 通过下式计算:

 $\bar{A}_{ij} = (A_{ij}^{SDC} + A_{ji}^{SDC})/2$ (6) 式中: A_{ij}^{SDC} 为 *i* 传感器发射信号, *j* 传感器接收信号时的 信号差系数。

成像时所计算的 SDC 为无量纲量,其物理意义为待 检测区域存在缺陷的权重,权重越大表明该区域存在缺 陷的概率越高,权重越小意味着该区域状态相对较好。

2 64 通道超声系统设计

本文设计的 64 通道超声系统的总体框图如图 1 所示。主要有 4 个部分,基于 TX7332 芯片的发射脉冲部分,基于 AFE5832LP 芯片的采集部分,CYUSB3014 FX3 通信部分,以及辅助电源管理模块。其中每块 TX7332 有 32 个通道,每块 AFE5832LP 有 32 个通道,FX3 的数据传输位 宽为 32 位。系统框图中各部分的关系是,AFE5832LP 的采集通道与 TX7332 发射通道通过 TR 开关隔离开,且共同连接到传感器,FPGA 主控单元通过SPI 接口配置发射芯片与采集芯片内部的大量的寄存器,使以上两个芯片正常工作,同时通过 FX3 通信与上位机电脑进行数据交互。

本系统设计的难点在于将 128 个通道的发射单元与 64 个通道的采集单元集成到一块横向尺寸为 4.3 cm,纵 向尺寸为 9 cm 的小型的 PCB 板内,可以实现 128 个通道 的同时独立发射,以及 64 个通道的高速同步采样,该系 统与几款超声相控阵仪器对比如表 1 所示,表明该系统 在现有同类的超声相控阵仪器中体积和功耗都很小。



图 1 64 通道超声系统框图

Fig. 1 Block diagram of 64-channel ultrasonic phased array system

表1 多个超声相控阵仪器对比

Table 1 Comparison of several ultrasonic

phased array instruments

| | 仪器型号 | | | | |
|--------------------|------------------|-------------|-------------|----------|--|
| 参奴 | CTS-PA22X | OmniScanX3 | CTS-PA322T | 本系统 | |
| 体积/mm ³ | 238×188×403 | 330×215×142 | 410×120×280 | 40×70×90 | |
| 功耗/W | 25~50 | > 50 | 50 | >1.404 | |
| 通道数 | 32 通道 | 32 通道 | 64 通道 | 64 通道 | |
| 带宽/MHz | 0.5~15 | 0.5~18 | 0.5~15 | 0.02~25 | |
| 脉冲宽度/ns | $20 \sim 1\ 000$ | 30~500 | 10~600 | 5~16 666 | |

2.1 TX7332 单通道发射调试

TX7332 发射的程序编写步骤如图 2 所示。第1生成 BF_CLK 信号;第2 片上波束初始化;第3 将芯片设置成动态功率模式;第4 循环生成激励信号 TR_EN * 和同步信号 TR_BF_SYNC。

其中与TX7332芯片使用相关的寄存器配置如表 2 所示。

示波器捕捉到的单通道 TX7332 发射测试结果如 图 3 所示,图中为发射单脉冲的模板,正负高压为+32 V 和−32 V,其中正负高压均持续 100 ns。在模板中有 170 ns 的尾部状态即脉冲输出为接地电平 170 ns。

2.2 AFE5832LP 单通道采集测试

AFE5832LP 采集控制程序的编写步骤如图 4 所示。 第1,AFE5832LP 芯片的初始化;第2 配置 ADC 寄存器 并将 VCA 设置成 TGC 模式,同时使能芯片的自动偏置 校正,选择偏置校正的样本数;第3 配置 DTGC 为固定



· 35 ·

图 2 发射程序编写步骤

Fig. 2 Procedure of transmission program

表 2 TX7332 发射芯片的寄存器配置

Table 2 TX7332 register configuration

| 寄存器地址(16 进制) | 数值 | 说明 |
|--------------|----------|-----------------|
| 初始化寄存器配置 | | |
| $20 \sim 2F$ | 00000000 | 延迟曲线寄存器 |
| 120 | 0000078 | 模式配置寄存器 |
| 18 | 00000001 | TX_BF_MODE 置 1 |
| 用户定义寄存器配置 | | |
| 0 | 00000001 | 软件清零 |
| 19 | 40000400 | 动态功率模式设置 |
| 2F | 01110111 | 延迟曲线配置 |
| 120 | 00078182 | 模式配置寄存器1 |
| 124 | 07434142 | 模式配置寄存器 2 |
| 19 | 40000400 | 数据尾设置 |
| 0 | 00000008 | LOAD_PROF 置 1 |
| 16 | 01000100 | 延迟曲线选择 |
| 1 E | 00000001 | 模式配置文件选择 |
| 1F | 00000001 | 模式配置文件选择 |
| 18 | 008C0003 | TX_START_DEL 设置 |



模式;第4生成同步脉冲信号 TX_TRIG,产生 ADCCLK; 第5使用 ISERDESE2 原语进行串并转换。



图 4 采集程序编写步骤 Fig. 4 Procedure of data acquisition

增益 FPGA ILA 核捕捉到的双通道 AFE5832LP 的波 形图如图 5 所示。其中 rx_data 为 LVDS 输入引脚的串行 数据,该串行数据在不同时刻对应不同的通道的数据,当 帧时钟为高电平时,串行数据传输的是 31 通道的数据, 当帧时钟为低电平时,串行数据传输的是 32 通道的数 据,其中 ch1_buffer 为 31 通道的数据,ch2_buffer 为 32 通 道的数据。LVDS 输入引脚输入的信号为 1 MHz,200 mV 的正弦信号。



(a) Channel 31 data acquisition



(b) 32通道采集数据(b) Channel 32 data acquisition





2.3 FX3 通信测试

FX3 通信主要通过状态机实现通信。FX3 通信主要 有 3 个状态,读状态,写状态和空闲状态,3 个状态之间 的切换如图 6 所示,其中初始化时 FX3 处于空闲状态。



Fig. 6 FX3 communication state machine

FX3 通信测试程序主要实现读取上位机发送的固定 字节的数据和每个通道发送 10 位数据,发送数据内容为 1~1 022 的等差数列,其中公差为 1,总共有 32 个通道, 储存在一个 320×1 024 的缓存区中。其中测试时上位机 发送的数据为 1~10 的等差数列,公差为 1,上位机下位 机通信如图 7 所示。



(b) Diagram of host computer receiving data

图 7 上位机下位机通信



2.4 64 通道采集与发射测试

在 64 通道采集与发射测试时,主要包括发射延时精 度测试实验和多通道同步采样实验。64 通道采集与发 射主板实物图如图 8 所示,其横向尺寸为 4.3 cm,纵向尺 寸为 9 cm。64 通道整体的结构框图如图 9 所示。其中 由 LabVIEW 搭建的上位机接收 AFE5832LP 采集到的数 据,并且可以通过上位机配置每个通道的延时时间,发射 脉冲的使能允许以及每个通道的脉冲模板。

在进行多通道同步采样实验时,每个通道的串行数

据与采样时钟信号对齐是一个问题,单独依据 ISERDESE2原语的BITSLIP位进行对齐是做不到的,而 解决这个问题的方法是将ISERDESE2原语的BITSLIP 位与IDELAY原语结合起来,对串行数据输入的延时进 行微调,再结合BITSLIP移位寻找串行数据的数据头,最 后实现串并转换数据的对齐。同时上位机在接收 AFE5832LP采集到的数据时,如何将各通道的采样数据 按通道数顺序组合传输并且上位机能够分离开组合后的 数据,然后分别显示各通道的采样数据也是一个问题,该 问题的解决方法是开辟一个宽度为640,深度为1024的 数据缓冲区,用于储存需要传输的组合数据,然后上位机 将传输的数据每640位拆分为640位的布尔数值,然后 再每10位布尔数值组合成一个通道采样数据,总共有64 个通道。



图 8 64 通道主板实物图 Fig. 8 Physical product of 64-channel mainboard



图 9 64 通道整体结构



1) 延时精度测试实验

上位机脉冲模板设置为 5 M 和单个脉冲,以及 64 个 通道每相邻两个通道延时间隔设置为 20 个 BF_CLK 即 100 ns,其中 33 通道 34 通道两通道脉冲对比图如图 10 所示。

在本实验中测量了 5 次 33~48 通道的延时时间间 隔,5 次测量都是间隔 5~6 h 以上才测量一次,测量的结 果如表 3、4 所示,其中测量的偏差在 1 ns 以内,延时精度 为 5 ns。



图 10 两通道脉冲发射对比

Fig. 10 Pulse transmission comparison of two channels

表 3 33~48 通道偶数通道延时 Table 3 33~48 channel even channel delay

| | | | | | | _ |
|----|--------|-----------|--------|--------|--------|---|
| 伯旦 | 相 |]对于 33 通过 | 道的偶数通道 | 道的延时时间 |]/ns | |
| 细石 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 34 | 100.1 | 100.7 | 100.1 | 100.7 | 100 | _ |
| 36 | 299. 9 | 300. 1 | 300.7 | 300.3 | 300.4 | |
| 38 | 499. 9 | 500. 2 | 500.7 | 500.3 | 500.4 | |
| 40 | 699. 9 | 700.1 | 700.4 | 700.3 | 700. 2 | |
| 42 | 899. 9 | 900. 2 | 900.4 | 900.3 | 900.4 | |
| 44 | 1 100 | 1 100 | 1 101 | 1 100 | 1 100 | |
| 46 | 1 300 | 1 300 | 1 301 | 1 300 | 1 300 | |
| 48 | 1 500 | 1 500 | 1 501 | 1 500 | 1 500 | |

表 4 33~48 通道奇数通道延时

Table 4 33~48 channel odd channel delay

| 疟早 | 相对于 34 通道的奇数通道的延时时间/ns | | | | | |
|----|------------------------|--------|-------|-------|-------|--|
| 细石 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 35 | 100 | 100.3 | 100 | 99.85 | 100 | |
| 37 | 300 | 300. 2 | 300 | 299.7 | 300 | |
| 39 | 500 | 500.3 | 500 | 499.7 | 500 | |
| 41 | 700.1 | 700. 2 | 700 | 699.7 | 700 | |
| 43 | 900.1 | 900. 5 | 900 | 899.7 | 900 | |
| 45 | 1 100 | 1 099 | 1 100 | 1 100 | 1 100 | |
| 47 | 1 300 | 1 299 | 1 300 | 1 300 | 1 300 | |

2)同步采样

上位机收到 AFE5832LP 采集的多通道波形如图 11 所示。通道输入信号为 1 MHz,200 mV 的正弦信号。采 样通道为 33、34、47、48 等 4 个通道。

2.5 船型试块缺陷检测

在本实验中,检测选定位置的缺陷,有16个通道同时发射,每个通道的延时时间为0ns,16个通道同时接收,选定的超声换能器参数如表5所示,该换能器为收发一体。其中发射通道为33~48通道,脉冲电压为±32V,脉冲个数为单个,接收通道也是33~48通道。缺陷检测的位置示意图如图12所示,上位机采集的16个通道的





回波信号如图 13 所示。检测的船型试块材料为铝,且图 片上有标注超声换能器,缺陷以及对应的回波信号的 位置。

主 5

招吉埳能器参数

| Table 5 Ultrasonic tr | ansducer parameters | |
|-------------------------|---------------------|---|
| 参数名称 | 参数值 | |
| 中心频率/MHz | 5 | |
| 阵元数目/个数 | 64 | |
| 阵列孔径/mm | 38.3 | |
| 阵元长度/mm | 10 | |
| 阵元宽度/mm | 0.5 | |
| 相邻阵元中心距/mm | 0.6 | |
| | | - |



图 12 检测位置 Fig. 12 Detection position

2.6 64 通道系统关键参数

64 通道系统关键参数是指在 TX7332 发射中决定脉



冲发射时序的信号,在 AFE5832LP 中决定采样频率的信号,FX3 通信的通信速度,以及旋转编码器可调正负高压范围等如表 6 所示。

表 6 系统关键参数

| Table | 6 | System | key | parameter |
|-------|---|--------|-----|-----------|
|-------|---|--------|-----|-----------|

| | • • • • |
|------------|--------------------------------|
| 参数名称 | 说明 |
| BF_CLK | TX7332 中控制片上波束形成的时钟信号,200 MHz |
| TR_BF_SYNC | TX7332 发射同步脉冲,宽度为 15 个 |
| | BF_CLK 为150 ns,频率为1 kHz |
| SCLK | TX7332 中 SPI 通信时钟,20 MHz |
| ADCCLK | AFE5832LP 数据采集频率时钟,100 MHz |
| TX_TRIG | AFE5832LP 各个通道采样的同步触发脉冲, |
| | 宽度为150 ns,频率为1 kHz |
| SCLK16 | AFE5832LP 中 SPI 通信时钟,20 MHz |
| clk_100m | FX3 通信时钟,频率为 100 MHz |
| HVP/HVM | 旋转编码器可调正负高压,范围是±12.16~±84.48 V |

3 导波层析成像实验

为了验证超声检测系统的可靠性,本文在一块尺寸 为1000 mm×1000 mm×10 mm的6061-T6铝合金板上开 展了导波层析成像实验,实验设置实物图如图14所示。 实验所用的信号为一个周期的方波脉冲信号,其中心频 率为60 kHz。由铝板的频散曲线可知如图15所示,在该 频率下能够有效激励A0模态的兰姆波。实验采用了导 波成像实验中经典的环形传感器阵列。其中,64个压电 式传感器通过环氧树脂粘合剂以板中心为圆心,350 mm 为半径等间距均匀地安装在铝板上。为了模拟真实工况 下的工件情况,实验前通过CNC数控机床加工的方式在 铝板上加工了3个形状和大小互不相同的不规则缺陷。 在实验中,分别采集了各个压电式传感器在表面光洁铝 板上的基准信号和铝板上贴附了一块不规则橡皮泥情况 下的缺陷信号,实验的最后采用本团队自主研发的超声 导波层析成像平台和信号相关系数(signal correlation coefficient, SCC),信号衰减系数(attenuation),最大峰 (maximum peak)以及波速变化(wave speed variation, WSV)4种方法对橡皮泥进行了成像。该方法常用于对 安装在待测工件上的传感器进行标定和测试。在实际应 用中,由于收集基准信号存在较大的难度,技术人员可以 通过直接采集传感器安装于在役工件上的信号作为基准 信号,以贴附橡皮泥后采集到的信号作为缺陷信号进行 传感器的性能测试。



图 14 实验设置实物图 Fig. 14 Real picture of experiment settings



实验的过程是,64个压电传感器按顺序1~64每次 只激励一个压电传感器,然后64个通道同时采集回波信 号。实验分两组进行,先采集没有橡皮泥的铝板上的基 准信号,再采集放置有一块橡皮泥的缺陷信号。

导波成像结果如图 16 所示。从图 16 中可知,4 种方 法均有效对贴附在铝板上的橡皮泥进行了成像。通过对 比成像结果可知,信号相关系数具有最好的成像效果和 鲁棒性,信号衰减系数和最大峰方法同样对缺陷进行了 定位。相比之下,波速变化方法的成像结果与真实橡皮 泥相比产生了较大的扭曲和伪影。值得一提的是,如果 希望利用该算法进行工件结构的缺陷检测,需要事先采 集工件表面无缺陷时的信号作为基准信号。由于超声导 波层析成像平台所采用的算法为射线层析成像算法,该 算法被理论证实仅能对横向尺寸大于第一 Fresnel 区的 缺陷进行有效成像,算法的成像结果中存在着较大的伪 影,对最终的分析和研究造成了一定的影响。如果希望 得到更好的成像效果,需要采用考虑了声波散射效应的 衍射层析成像算法^[19]或深度学习算法^[20] 对缺陷进行 成像。



4 结 论

本文设计了一种超小型手持式的超声检测系统,主要研究了 64 通道超声检测系统搭建。关于 64 通道的超 声检测系统的搭建,先调试单通道的超声发射,单通道的 超声采集,以及 32 位位宽的 FX3 通信,然后将超声发射 与采集通道数扩展到 64 个通道,同时再结合 FX3 通信, 实现上位机调整 TX7332 发射的设置参数,包括各通道的 延时时间,脉冲模板文件,以及各通道脉冲发射使能,同 时上位机接收 AFE5832LP 采集的数据,并生成波形图。

本文进行了延时精度测试实验以及多通道同步采样 实验验证了该系统的发射与接收的可行性,然后通过船 型试块缺陷检测实验以及超声导波成像实验,验证了该 系统整体设计的可行性。

在 64 通道的超声检测系统的搭建过程中,遇到了如下几个问题,上位机在通过 FX3 读取下位机发送的AFE5832LP 采集数据时,会大约间隔 1 min 以上,发生一次 FX3 写数据超时错误,该问题的解决方法是以数据包的形式发送数据,同时在脉冲发射时有几个通道没有脉冲信号,这个问题是因为发射芯片供电电压过低导致的。

参考文献

[1] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.

JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.

[2] 孙小磊,王雪臣,孙钟,等.小管径、薄壁不锈钢焊缝的超声相控阵检测[J].电焊机,2021,51(7):31-36,114-115.

SUN X L, WANG X CH, SUN ZH, et al. Ultrasonic phased array inspection on stainless steel weld of light wall thickness and diameter [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(7): 31-36,114-115.

- [3] 李秀峰,付汝龙,杨宝林.碳纤维复合材料全聚焦3D 相控阵超声检测[J].无损探伤,2021,45(4):31-34.
 LI X F, FU R L, YANG B L. Full focus 3D phased array ultrasonic testing of carbon fiber composites [J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 45 (4): 31-34.
- [4] 宋晓峰,朱爱希,张迪,等. 钢结构 H 型钢焊缝超声相 控阵自动检测系统的设计及应用[J]. 焊接技术, 2021,50(3):70-73.

SONG X F, ZHU AI X, ZHANG D, et al. Design and application of ultrasonic phased array automatic testing system for the weld of H shaped steel [J]. Welding Technology, 2021, 50(3): 70-73.

- [5] ZHANG J L, LIU L, LI L X. Research on internal defect detection of concrete structure based on ultrasonic phased array technology [J]. Journal of Simulation, 2020, 8(4): 18-20.
- [6] 黄海鸿,刘文杰,钱正春,等.零件表面损伤对再制造修复件承载能力影响的超声相控阵检测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(7):32-41.

HUANG H H, LIU W J, QIAN ZH CH, et al. Influence of surface damage on load carrying capacity of remanufactured repair parts based on ultrasonic phased array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 32-41.

[7] 刘婧. 超声相控阵 T 型焊缝缺陷检测技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2010.

LIU J. Research on flaw detection technology of ultrasonic phased array for T-weld[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

[8] 章东, 桂杰, 王晓玲, 等. 等高度聚焦算法的超声相

控阵检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2):42-47.

ZHANG D, GUI J, WANG X L, et al. Phased array ultrasonic detection using equal height focusing algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 42-47.

 [9] 贾乐成,陈世利,白志亮,等.超声全聚焦成像校正 模型及加速算法[J].仪器仪表学报,2017,38(7): 1589-1596.
 JIALCH, CHENSHL, BAIZHL, et al. Correction

model and accelerating algorithm for ultrasonic total focusing method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1589-1596.

- [10] 金士杰,刘晨飞,史思琪,等. 基于全模式全聚焦方法的裂纹超声成像定量检测[J]. 仪器仪表学报,2021,42(1):183-190.
 JIN SH J, LIU CH F, SHI S Q, et al. Quantitative crack detection by ultrasonic imaging with the full-mode total focusing method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(1):183-190.
- [11] 宋寿鹏,张瑜,吴华清. 全矩阵线形超声换能器阵列 声场仿真与设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 162-168.
 SONG SH P, ZHANG Y, WU H Q. Simulation and design of acoustic field for full matrix linear transducer array[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20): 162-168.
- [12] 兰晓峰,张渝.重载铁路钢轨相控阵探伤系统研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(12):47-55.
 LAN X F, ZHANG Y. Research on heavy haul railway inspection system based on the phased array technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(12): 47-55.
- [13] 敬博通,聂鹏飞,党凯强. 基于 COMSOL 对超声相控 阵特性对比分析[J]. 国外电子测量技术,2021, 40(1):53-57.
 JING B T, NIE P F, DANG K Q. Comparative analysis of ultrasonic phased array characteristic based on COMSOL [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(1):53-57.
- [14] 祁小凤,肖迎春,李闵行,等. 128 通道超声相控阵 发射电路系统的设计[J].无损检测,2015,37(4): 41-46.

QI X F, XIAO Y CH, LI M H, et al. Design of 128channel ultrasonic phased array transmitting system[J]. Nondestructive Testing, 2015,37(4):41-46.

[15] 金雷. 晶片表面微观形貌对压电式力传感器性能影响

规律研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.

JIN L. Influence of sheet micro-topography on the performances in piezoelectric force sensors [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[16] 杨晓霞. 超声相控阵汽车发动机内腔腐蚀检测关键技术研究[D]. 天津:天津大学,2014.

YANG X X. Study on the key technology of corrosion testing for automobile engine cylinder cavity using ultrasonic phased array[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[17] 孙芳. 超声相控阵技术若干关键问题的研究[D]. 天津: 天津大学,2012.

SUN F. Research on several key issues of ultrasonic phased array technology [D]. Tianjin : Tianjin University, 2012.

- [18] 赵辉. 基于电磁超声兰姆波层析成像的盲孔缺陷定量 描述研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
 ZHAO H. Research on quantitative characterization of blind hole defect based on electromagnetic ultrasonic lamb wave tomography [D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2018.
- [19] HUTHWAITE P, SIMONETTI F. High-resolution imaging without iteration: A fast and robust method for breast ultrasound tomography [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130 (3): 1721-1734.
- [20] LIN M, LIU Y. Guided wave tomography based on supervised descent method for quantitative corrosion imaging [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2021, 68 (12): 3624-3636.

作者简介



吕灿,2018年于天津大学获得本科学位,现为天津大学研究生,主要研究方向为超声相控阵无损检测和超声导波无损检测。 E-mail:1343950498@qq.com

Lyu Can received his B. Sc. degree in 2018 from Tianjin University. Now he is a

M. Sc. candidate in Tianjin University. His main research interests include ultrasonic phased array detection system and ultrasonic guided wave detection.



陈世利,分别在 1997 年和 2003 年于天 津大学获得学士和博士学位,现为天津大学 精密仪器与光电子工程学院副教授,主要研 究方向为无损检测技术、管道泄露检测。 E-mail: slchen@tju.edu.cn

Chen Shili received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 1997 and 2003, respectively. Now he is an associate professor in Tianjin University. His main research interests include non destructive testing and pipeline leak detection.



刘洋(通信作者),2014 年于美国宾夕 法尼亚州立大学获得博士学位,现为天津大 学精密仪器与光电子工程学院教授,主要研 究方向为超声传感器与超高分辨率成像技 术,主要应用领域为无损检测及油田测井。 E-mail: ultrasonicslab@tju.edu.cn

Liu Yang (Corresponding author) received his Ph. D. degrees from Pennsylvania State University in 2014. Now he is a professor in Tianjin University. His main research interests include ultrasonic sensor and ultra-high resolution imaging technology, his main application fields include nondestructive testing and oil field logging.