

基于 LabVIEW 的时间反转超声检测系统的开发

李义丰, 王菁菁

(南京工业大学 计算机科学与技术学院, 南京 211816)

摘要: 时间反转技术在超声无损检测中的应用非常广泛, 它可以忽略介质的非均匀性及初始信号源的位置, 能够在时间和空间上聚焦超声波, 实现对介质缺陷的聚焦检测; 基于 LabVIEW 图形化编程软件, 结合计算机、信号发生器、示波器、超声换能器、 GPIB 等的使用, 对超声检测系统实验平台进行了构建, 实现了超声信号的发射、接收以及时间反转一系列的信号处理过程; 系统工作过程中, 采用了 3 种不同的时间反转技术: 经典时间反转技术 (time reversal: TR)、反向滤波技术 (inverse filter: IF) 及 1 位处理技术 (1bit processing), 来实现信号的聚焦, 其中反向滤波处理技术取得的信号聚焦效果较好, 信噪比较低, 而运用 1 位时间反转技术可以有效增加聚焦信号的幅值, 使幅值提高 3.5 dB 左右; 实验验证该系统可以有效的实现时间反转超声检测过程中对信号的激励、接收、处理和存储等功能, 有良好的精确性和适用性。

关键词: 时间反转; LabVIEW; 超声检测

Design of Time Reversal Ultrasonic Detection System Based on LabVIEW

Li Yifeng, Wang Jingjing

(College of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The application of time reversal technique in ultrasonic nondestructive testing is very extensive, which can focus ultrasonic waves in time and space and realize a flaw detection, regardless of the position of the initial source and of the heterogeneity of the medium. In this paper, with the combined application of LabVIEW, signal generator, oscilloscope, ultrasound transducer and GPIB, an acoustic detect testing system has been constructed which achieves some functions including signal generation, acquisition, time reversal processing, and so on. When the test system is working, three different kinds of time-reversal techniques can be chosen to focus the ultrasonic signal: Time Reversal (TR), Inverse Filter (IF) and 1Bit Processing (1B). The technique of Inverse Filter (IF) has the best ability of localization and a lowest signal to noise ratio in the three techniques. The technique of 1Bit Processing can effectively increase the amplitude of the focusing signal, the amplitude can increase about 3.5 dB. The experiment results have verified that in the process of ultrasonic nondestructive testing the system can realize some functions: signal generation, acquisition, procession and storage and it has good accuracy and adaptability.

Keywords: LabVIEW; time reversal; ultrasonic testing

0 引言

超声检测由于所需的设备简单, 对检测物体以及环境没有污染和危害, 是一种应用广泛, 使用频率很高并且在国内发展很快的无损检测技术^[1-2]。它的检测原理是: 超声波遇到缺陷时, 声波会产生反射、散射等声学物理现象, 这使得接收信号在时间、幅值以及频率等方面发生变化, 对接收信号进行分析处理, 不仅能够判断是否存在缺陷, 而且能估计内部缺陷的位置和大小等。

在超声无损检测发展的过程中, 时间反转技术^[3-4] (TR) 得到了广泛的应用, 它是接收端接收到声源发射的信号后, 将其进行时间反转处理, 再由接收换能器发射出去, 使得再次接受的信号实现自适应聚焦的技术, 其在很多科技领域中得到应用, 如无损检测 (NDT)^[5-7]、医学治疗与诊断^[8]、负折射成像^[9]及结构健康监测^[10]等。传统的超声检测方法有波长长、

频率低、分辨率低等缺点, 适用性较弱; 而时间反转技术是一种不需要传播介质和换能器的先验知识就可以实现声波自适应聚焦和检测的方法, 它可以忽略介质的非均匀性及初始信号源的位置, 而具有在时间和空间上自动聚焦超声波的能力。

由美国国家仪器 (NI) 公司研制开发的 LabVIEW 是一种程序开发软件, 它是一种图形化的编程语言, 与其他基于文本代码的编程语言相比, LabVIEW 的程序是框图的形式, 使用的时候更加方便和直观。本文基于时间反转技术的应用, 采用 LabVIEW 图形化编程语言, 对整个超声检测系统进行了开发, 实现对超声信号的激发、接收、反转及聚焦等过程。

1 超声时间反转检测系统的设计

1.1 实验系统的组成

本实验系统由计算机、信号发生器、功率放大器、同步触发器、示波器、超声探头等构成, 系统连接框图如图 1 所示。检测过程中, 任意信号发生器产生一激励信号, 该信号通过功率放大器放大后, 由发射超声探头送入待测介质中, 之后接收探头对介质中传播的超声信号进行检测, 并由示波器对该波形进行显示和存储; 对接收信号的时间反转处理过程由运行于计算机上的 LabVIEW 程序实现; 反转处理后的信号再次由超声发射探头传输到待测介质中, 此时, 接收端探头检测的信号将会是一个聚焦信号, 此信号可以在计算机及示波器上进行显示

收稿日期: 2015-08-09; 修回日期: 2015-09-16。

基金项目: 国家自然科学基金 (61571222)。

作者简介: 李义丰 (1976-), 男, 江苏人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事超声无损检测、声人工结构设计方向的研究。

王菁菁 (1987-), 男, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 主要从事超声无损检测方向的研究。

和存储。

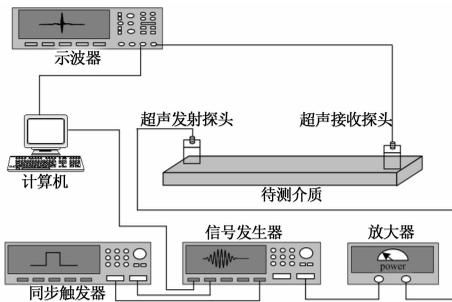


图 1 实验系统连接框图

1.2 软件系统的设计

根据上述的聚焦检测过程, 可以得出 LabVIEW 软件在实验中的功能主要有两个方面: 一个是对信号发生器和示波器等硬件进行控制, 另一个是对信号进行时间反转处理并将其再次发射。

LabVIEW 软件开发平台分为前面板和后面板两个部分, 前面板是图形用户界面, 也就是虚拟仪器面板, 由输入控制和输出显示构成。输入控制是用户输入数据到程序的接口, 而输出显示是输出程序产生的数据接口。即将要介绍的软件前台界面或者说操作界面就是 LabVIEW 程序的前面板, 后面板又叫做框图程序, 所有的 LabVIEW 程序代码都是由框图构成的, 其采用数据流编程方式, 程序框图中节点之间的数据流向决定了 VI (虚拟仪器) 及函数的执行顺序, 节点类似于文本语言程序的语句、函数或者子程序。LabVIEW 有二种节点类型: 函数节点和子 VI 节点。前面板中的每一个显示或者控制都能在后面板中找到与之对应的部分。

1.2.1 软件界面

本检测系统的软件前台界面, 整体由 4 个部分构成: 信号源和时间反转类型选择区、信号发射区、信号反转区及波形显示区。信号源和时间反转类型选择区位于界面的上端, 可以实现对信号源的种类及时间反转过程进行选择。信号发射区和信号反转区分别位于界面的左端和右端, 可对信号发生器所产生信号的频率、幅值、偏移量、相位、所加窗函数的类型进行设置; 并可以控制示波器的波形存储路径地址, 设置示波器的采样速率、扫描幅值、扫描频率、上升时间等。波形显示区位于中间部分, 分别显示超声时间反转检测过程中示波器接收到的 4 个波形, 第一个是第一次发射的激励信号的波形, 第二个是通过待测介质传输后换能器接收到的信号波形, 第 3 个是接收信号经过时间反转处理后的波形, 最后一个是时间反转后的信号再次由信号发生器发射, 通过待测介质传输后示波器接收到的聚焦波形。

1.2.2 软件系统架构

在实现对该超声检测系统的构建过程中, 除了要完成对硬件系统的连接之外, 还需要对软件系统进行设计。软件设计的过程中, 首先要做的就是实现软件系统的架构。软件架构描述的对象是直接构成系统的抽象组件, 各个组件之间的连接则明确和相对细致地描述组件之间的通讯, 这些抽象组件被细化为实际的组件, 比如具体某个类或者对象^[11]。

在充分的理解了整个实验过程的流程以及各个流程的功能

后, 按照实验过程的流程设计了软件的顺序结构。各个流程的功能实现是由具备各自具体功能的多个模块组成, 顺序结构的设计中不同步骤可以重复使用这些模块。图 2 所示为本软件顺序结构中的第 4 个步骤, 即信号时间反转之后再次发射实现聚焦并在示波器上显示的这个步骤, 从图中顺序结构的下拉框中可以看到本软件系统顺序结构的构成。采用 LabVIEW 的顺序结构化编程, 清楚的显示了信号处理的先后顺序, 使得编程的思路更加清晰。

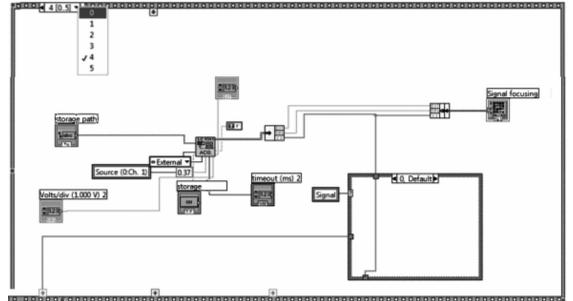


图 2 软件顺序结构中的第 4 个步骤

在系统软件开发的过程中, 除了采用顺序结构的编程方式外, 还充分运用模块化程序设计的理念和思想, 进行功能单元的模块化设计。模块化设计的目的是为了降低程序复杂度, 使程序设计、调试和维护等操作简单化。根据模块化编程的思想, 软件的各项功能模块相互合作组成软件的整体, 并且可以根据要实现的功能进行模块的组合搭配; 一个模块如果进行细分还能分解成几个有各自具体功能的子模块, 很多子模块都将在软件系统的不同功能处多次重复使用。本文将按照顺序结构的顺序, 对软件的各个步骤、各个功能子模块进行详细的介绍。

1.2.3 信号激励

信号激励模块的第一个子模块是信号源模块, 系统检测过程中提供了两种激励信号源, 一种是单一脉冲信号 (如正弦脉冲信号), 另一种是线性调频脉冲信号, 如图 3 所示。两种激励信号的选择可以在前台界面的信号源及时间反转类型选择区来完成。前面板中设置的信号频率、幅值、偏移量、相位等参数的后台控件都在这里, 这些设置在这里控制一个 LabVIEW 中的信号发生器 VI。

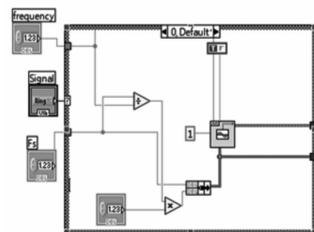


图 3 单一脉冲信号激励源

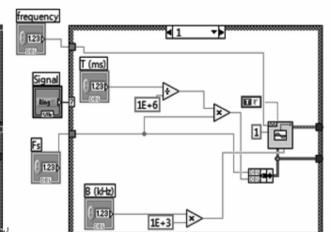


图 4 线性调频脉冲激励源

提供两种信号源的原因是单一脉冲信号源所携带的能量比较低, 在实验过程中, 经过待测介质传输后接收到的信号较弱, 这将导致比较差的信噪比。线性调频脉冲激发技术解决了这些问题, 线性调频脉冲激发技术的原理是对发射的宽带调频 (FM) 脉冲, 在相位和振幅等方面进行校正和补偿, 使换能器

输入较小的峰值功率而得到较大的信噪比^[12]，提高了信号聚焦的能量，并且对信号的各种衰减有很强的鲁棒性^[13]。实验中分别用这两种信号作为激励信号，实验结果表明采用线性调频脉冲信号可以有效提高信号的聚焦能量和信噪比，其聚焦信号幅值增益为 12 dB^[14]。而为了降低信号的时域旁瓣，我们需要引入第二个子模块——窗函数模块，为信号发生器产生的激励信号加一个窗口函数，可以选择汉宁窗、海明窗、高斯窗等对超声波激励信号进行调制。

要构成完整的信号激励模块，最后还需要加入一个控制计算机与示波器相连接，使得软件能过操控硬件的模块，如图 5 所示。只有加入这个模块，才能直接通过软件设置信号发生器上的一系列参数，并对信号发生器进行控制，而不用手动去直接操作信号发生器。上述 3 个子模块相互作用一起工作，共同构成完整的信号激励模块，如图 6 所示，左下方为信号源子模块，下方中间部分为窗函数子模块，右上方为控制计算机与硬件相连接的模块。

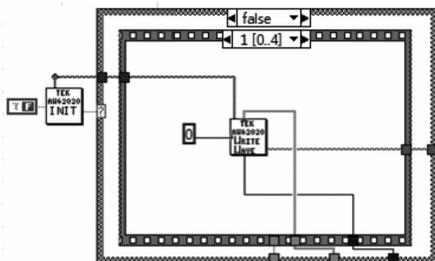


图 5 控制信号发生器与软件相连的子模块

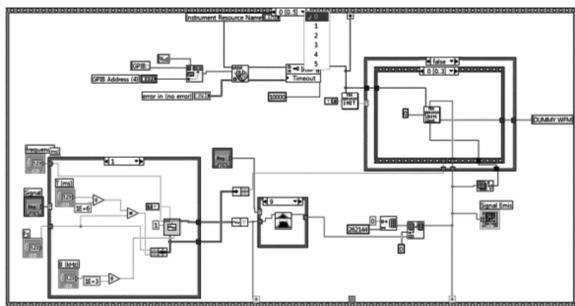


图 6 信号激励模块

1.2.4 示波器控制及波形存储

完成对示波器操作的控制模块如图 7 所示，用户可以直接在软件前台界面设置示波器的采样精度、扫描幅值、信号触发、等待时间等，同时，波形数据的存储路径也是在这里设置。

在该超声时间反转检测系统中，波形数据的存储是以数组的形式保存的：首先要记录第一个数据点采集时的时间，然后把每一个数据点与邻近数据点的相同间隔时间记为 t ，并把每一个数据点的幅值 (y 坐标) 以数组的形式存储起来。

1.2.5 时间反转模块

检测系统工作的过程中提供了 3 种不同类型的时间反转处理技术来实现信号的反转：经典的时间反转技术、1 位处理技术和反向滤波技术。不同时间反转技术的选择可以由前台界面中的信号源及时间反转类型选择区的设置来完成。

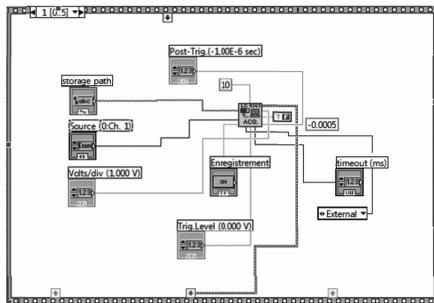


图 7 示波器控制模块

经典时间反转技术是指将信号在时域上取反之后，在对应的信号发生端重新发射的过程，是声互易性原理的应用之一，可以使能量在时间和空间上聚焦，并实现在声源位置的信号重构^[15]。由于超声时间反转检测系统在存储数据的时候采用数组的方式保存数据，所以要实现时域上的时间反转就要将原数组置 (将数组第一个元素放到最后一个，第二个放到倒数第二个，依此类推)。

经典时间反转模块的程序图如图 8 所示。

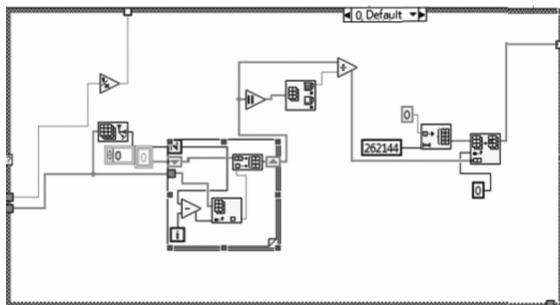


图 8 经典时间反转模块

第二种处理技术是 1 位时间反转处理技术，在经典时间反转的过程中，接收信号的瞬时幅值将被做时反处理并重新发射出去，而 1 位时间反转则不同，其按照接收信号的正负极性，时间反转的信号将被置为 ± 1 ：如果信号为正极性则置为 $+1$ ，如果信号值为负极性则置为 -1 。也就是说在 1 位时间反转过程中，我们只保留信号的相位信息，而舍弃了它的幅值信息^[14]。在程序中，我们要依次将示波器接收到的信号数组中的每一个数字与 0 比较大小，大于 0 的置为 $+1$ ，小于 0 的置为 -1 ，将这些数字重新构成一个新的数组，这样就实现了 1 位处理技术。运用 1 位时间反转技术，可以增加聚焦信号的幅值，1 位时间反转处理的程序图如图 9 所示。

第 3 种处理技术是反向滤波技术。反向滤波 (1F) 技术的实质是对系统的模态能量进行反转处理，其对反转过程中所有的固有模态进行加权，所得到的线性加权组合信号将作为发射信号在信号激励端再次发射，再次得到的信号就是聚焦信号。与传统的时间反转技术相比，反向滤波处理技术所得的信号聚焦效果更好，信噪比更高，这是由于系统中可能存在一些能量很弱的模态，时间反转处理技术并没有办法利用到这些模态，而反向滤波技术不同，它的聚焦过程利用到了系统所有的固有模态^[16]。图 10 为反向滤波的程序框图。

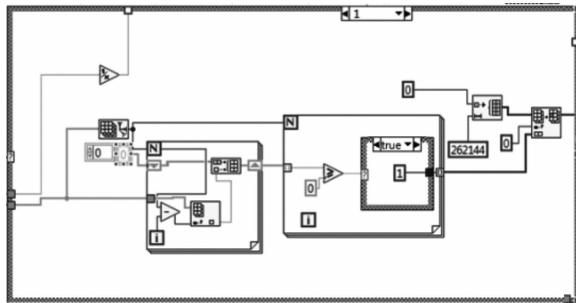


图 9 1 位时间反转处理

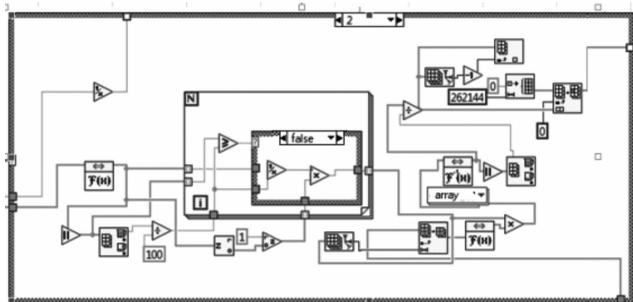


图 10 反向滤波技术

2 实验结果

利用该超声检测实验平台, 我们分别采用两种信号激励源和 3 种不同的时间反转处理技术来实现超声信号的聚焦检测, 聚焦信号波形如图 11 所示。其中, 图 (a) 为采用激励信号源是频率为 500 kHz 的 2 周期正弦脉冲信号, 聚焦过程为经典时间反转技术 (TR), 而得到的聚焦信号波形; 图 (b) 和 (c) 为激励信号源为周期 T 为 $100 \mu\text{s}$, 上下限截止频率为 200 kHz 和 1 200 kHz 的调频脉冲激发信号, 信号反转技术分别为 1 位时间反转 (1 Bit) 技术和反向滤波 (IF) 技术而得到的聚焦信号波形。从中可以看出, 运用 1 位时间反转技术可以有效增加聚焦信号的幅值, 幅值提高 3.5 dB 左右; 而反向滤波处理技术所得的信号聚焦效果最好, 具有非常小的信噪比。

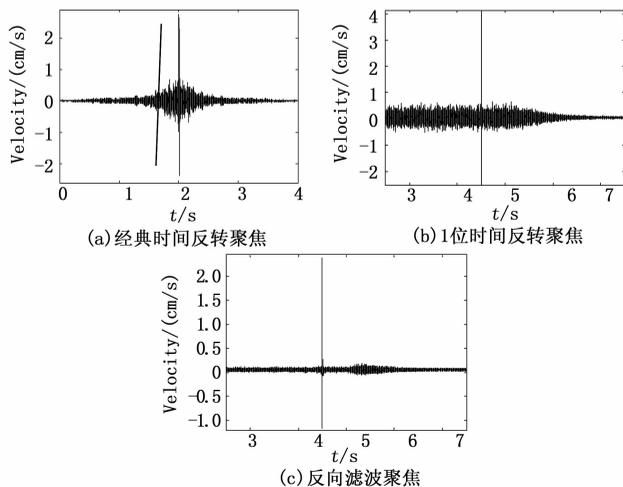


图 11 聚焦信号波形

3 结论

本文从硬件平台组成及软件系统设计两个方面介绍了超声

检测系统的构建, 并给出了时间反转聚焦的信号波形。系统的硬件由计算机、信号发生器、功率放大器、同步触发器、示波器、超声探头等按照功能需要连接而成。在软件系统的设计中, 我们基于 LabVIEW 的开发环境, 采用了顺序结构的设计方法, 并按照模块设计的思想完成了信号激励模块、示波器控制及波形存储模块以及时间反转模块的设计。实验结果证明该系统能够有效的实现信号的聚焦检测。

参考文献:

- [1] 朱晓恒, 高晓蓉, 王黎, 等. 超声探伤技术在无损检测中的应用 [J]. 测控技术, 2010, 21: 112-116.
- [2] 李大勇, 高桂丽, 董静薇. 非线性声学和时间反转声学在材料缺陷识别中的应用现状评述 [J]. 机械工程学报. 2009, 45 (1): 1-8.
- [3] Fink M, Cassereau D, Derode A, et al. Time-reversal acoustics [J]. Report on Progress in Physics, 2000, 63: 1933-1995.
- [4] Bou Matar O, Li Y F, Van Den Abeele K. On the use of a chaotic cavity transducer in nonlinear elastic imaging [J]. Applied Physics Letter, 2009, 95 (14): 141913.
- [5] Robert J L, Fink M. Spatio-temporal invariants of the time reversal operator [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127 (5): 2904-2912.
- [6] Quan L, Liu X Z, Gong X F. Nonlinear Nonclassic acoustic method for detecting the location of cracks [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112 (5): 054906.
- [7] Burrows S E, Dutton B, Dixon S. Laser Generation of Lamb Waves for Defect Detection: Experimental Method and Finite Element Modeling [J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2012, 42 (1): 82-89.
- [8] Olbricht W, Sistla M, Ghandi G, et al. Time-reversal acoustics and ultrasound-assisted convection-enhanced drug delivery to the brain [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134 (2): 1569-1577.
- [9] Pendry J B. Time reversal and negative refraction [J]. Science, 2008, 322: 71-73.
- [10] Harley J, Donoghue N, Moura J M F, et al. Time reversal focusing for pipeline structural health monitoring [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126 (2): 2197-2203.
- [11] 张纯, 张敬周, 宋俊典. 基于本体的软件密集型系统架构知识管理研究 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (6): 2050-2053.
- [12] 廉德钦, 何常德, 苗静, 等. 线性调频脉冲发声系统的设计 [J]. 压电与声光, 2013, 35 (1): 151-154.
- [13] Misaridis T, Jensen J A. Use of modulated excitation signals in medical ultrasound. Part I. Basic concepts and expected benefits [J]. IEEE Trans. Ultrason, Ferroelect, Freq. Contr., 2005, 52 (2): 177-191.
- [14] 李义丰, 姜卓. 混沌腔体换能器在非线性弹性检测中的应用 [J]. 声学学报, 2012, 37 (1): 74-80.
- [15] 邓菲. 基于时间反转的单通道管道导播检测新方法 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (6): 17-21.
- [16] 李义丰, Bou Matar O, 李宝顺. 混沌腔体换能器在反向滤波弹性检测中的应用及其仿真研究 [J]. 声学学报, 2014, 39 (4): 459-466.