

超声相控阵成像仿真系统研制

杨先明¹, 郭艳², 王海涛², 郭瑞鹏², 沈立军²

(1. 烟台富润实业有限公司, 烟台 264670; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要:采用 VC++ 与 Matlab 混合编程的方式, 研制了一套超声相控阵成像仿真系统。仿真系统由三大模块组成, 探头模块完成各探头参数的设置, 并可分析显示其声场声压分布及其指向性特性等; 缺陷模块模拟缺陷及并设定缺陷成像方式; 仿真成像模块完成探头发射超声波, 超声波在工件中传播并与缺陷相互作用产生回波信号, 回波信号被探头接收经包络提取、对数压缩、DSC 变换等一系列超声信号处理过程, 最终以图像形式显示。

关键词:超声相控阵; 成像仿真; 包络提取; 信号处理

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)10-0070-04

Simulation System Development of Ultrasonic Phased Array Imaging

YANG Xian-Ming¹, GUO Yan², WANG Hai-Tao², GUO Rui-Peng², SHEN Li-Jun²

(1. Yantai Furun Industrial Company with Limited Liability, Yantai 264670, China;

2. School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Using mixed programming of VC++ and Matlab, a simulation system of ultrasonic phased array imaging was developed. Simulation system composed of three modules, probe module set the probe parameters and can be used to analyze its sound pressure and directivity. Defect module simulates defects and choose defects imaging method. Simulation imaging module completes ultrasonic waves transmitted by the probe, propagating in the workpiece and generating echo signals through interaction with defects, then echo signals received by the probe, finally after series of signal processing, including envelope extraction, logarithmic compression, DSC transform and so on, showed graphically.

Keywords: Ultrasonic phased array; Imaging simulation; Envelop extraction; Signal processing

随着超声检测仿真技术可靠性的不断提高, 其重要性受到了人们的广泛关注, 其应用范围也从原来的检测结果分析、性能验证, 逐步扩展到检测系统设计优化、虚拟检测等领域^[1-2]。超声相控阵成像仿真就是利用计算机强大的信息处理功能, 以相控阵检测理论模型为基础, 仿真超声声场在介质中的传播及其与缺陷的相互作用, 人机交互式地进行检测参数优化, 为工程设计人员提供具有较高价值的参考。

Matlab 集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体, 包含大量功能强大的函数可供调用,

收稿日期: 2013-06-17

作者简介: 杨先明(1978—), 男, 硕士, 主要从事超声相控阵无损检测研究。

可大大加快软件开发的效率。但是 Matlab 是一种解释性语言, 执行效率比较低, 且不能与硬件底层进行直接操作。与此相反, VC++ 可以方便地进行硬件控制, 具有强大的界面编程功能, 程序执行速度快。基于此, 笔者充分利用 Matlab 与 VC++ 各自的优点, 通过 VC++ 调用 Matlab^[3-4]引擎方式, 开发了一套超声相控阵成像仿真系统。

1 系统架构设计

首先设置相控阵探头参数, 接着模拟被检试件中的缺陷, 建立仿真环境, 以仿真超声检测过程, 即探头发射超声波、超声波在工件中传播并与缺陷相互作用产生回波信号、回波信号被探头接收后经一系列信号处理过程最终得以图像形式显示。

超声成像系统的仿真分为三大模块,分别为:探头参数设置模块、缺陷参数设置模块、仿真成像模块,如图 1 所示。各模块彼此相互独立,分别完成一定的功能。从方便用户的角度出发,仿真系统采用多层次的分级模块驱动形式,首先在可视化交互式的软件主界面上,选择进入各功能子模块,在每一个功能子模块下,可以进行参数设置、程序运行、返回上级模块等操作。

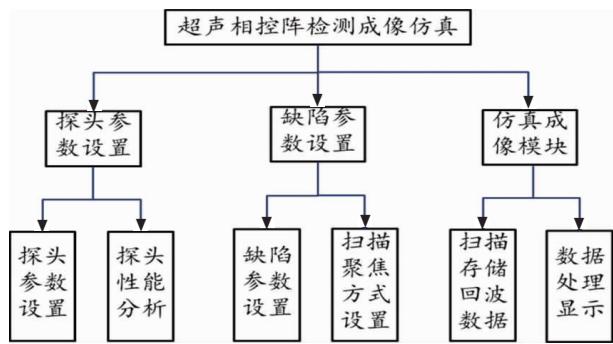


图 1 超声相控阵成像仿真系统

系统架构采用 VC++6.0 的对话框结构,由对话框类以成员变量的形式来保存探头参数、缺陷参数以及扫描聚焦方式等,而以.mat 的数据格式存储 A 扫描回波数据。

2 系统各模块设计及实现

2.1 探头参数设置模块

探头参数设置模块完成仿真探头参数设置,包括:阵元个数、阵元宽度、阵元高度、阵元间距、探头中心频率以及声速等。超声相控阵的声场特性关系到缺陷的定位定量以及检测精度和灵敏度,了解声场结构及分布特征对于提高检测可靠性、准确性以及提高检测效率都起着至关重要的作用^[5-6]。因此模块加入了探头性能分析功能,完成探头显示、探头在直角坐标系或极坐标系下的指向性分析以及探头声场声压的二维、三维显示。下面论述超声相控阵探头声场声压及指向性仿真理论基础。

超声相控阵探头的几何参数如图 2 所示,在 $p(r, \theta, t)$ 处产生的声压为:

$$p(r, \theta, t) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{p_0}{r} \right)^{1/2} \frac{\sin\left(\frac{ka \sin\theta}{2}\right)}{\frac{ka \sin\theta}{2}} \exp\left(-j \frac{ka \sin\theta}{2}\right) \exp[j(\omega(t - \Delta t_n) - k(r - (n-1)d \sin\theta))] \quad (1)$$

式中: a 为阵元宽度; d 为阵元间距; N 为阵元数; ω 为角频率; p_0 为线元在单位距离上产生的声压; k 为

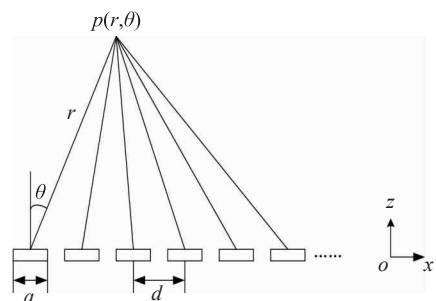


图 2 相控阵列声场计算

波数; Δt_n 为第 n 个阵元的延迟时间。

根据软件界面上用户输入的探头参数和公式(1),可以在无限大超声场空间中求出有限区域内有限个点的声压值,并以矩阵形式存储,然后以图像形式输出显示,此时就可完成探头声压分析功能。

线形矩形相控阵的声压指向性函数为^[7]:

$$D(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sin(N \frac{kd}{2} \sin\theta_1)}{N \sin(\frac{kd}{2} \sin\theta_1)} \cdot \frac{\sin(\frac{ka}{2} \sin\theta_1)}{\frac{ka}{2} \sin\theta_1} \cdot \frac{\sin(\frac{kb}{2} \sin\theta_2)}{\frac{kb}{2} \sin\theta_2} \quad (2)$$

式中: a, b 分别为阵元在 x 方向和 y 方向的宽度; θ_1 为声束在 xOz 平面上的投影与 z 轴的夹角; θ_2 为声束在 yOz 平面上的投影与 z 轴的夹角; k 为波数。

同理,根据用户输入的探头参数及公式(2)可以求出相控阵探头各方向的指向性,并以图像形式输出。如图 3 和 4 所示为探头参数设置模块运行界面,其中用户输入相控阵探头参数为:阵元个数 16, 中心频率 4 MHz, 阵元宽度 0.45 mm, 阵元间隙 0.05 mm, 声速 5920 m/s。图 3 为探头偏转 30° 时的指向性图,图 4 为探头聚焦在 40mm 处的声场声压界面。通过以上对声场声压及指向性的仿真显

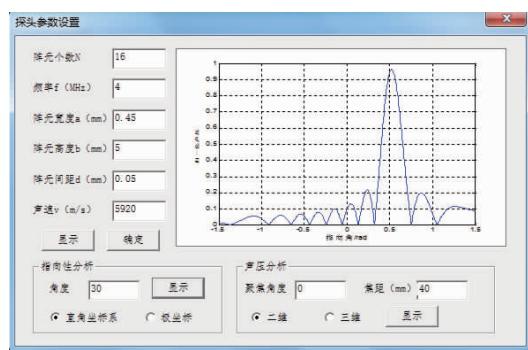


图 3 探头参数设置模块探头指向性

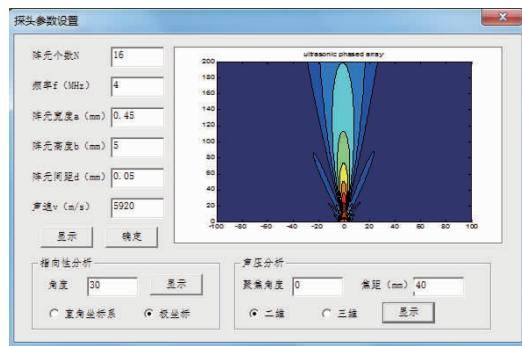


图 4 探头参数设置模块探头声压分布

示,可以很直观地看到各种不同探头的声场分布情况。

此外,还可以通过人机界面改变各探头相关参数,观察声场声压及指向性变化,分析和研究各参数对声场的影响,为在超声检测过程中探头各项参数

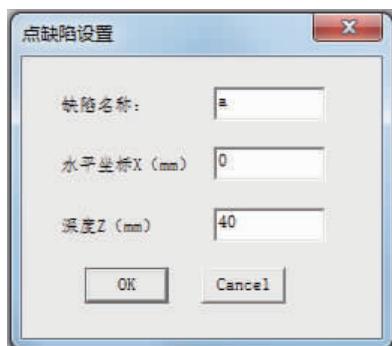


图 5 添加点缺陷



图 6 添加体缺陷



图 7 缺陷设置模块运行界面

2.3 缺陷成像模块

在已有的超声成像系统仿真方案中,field II 是现今在学术界、工业界广泛应用的声场仿真程序,其可以产生在多种阵列条件下的仿真声场及阵列的接收信号。因此出于仿真发射声场与缺陷相互作用的复杂度和 field II 权威性的考虑,模块采用 field II 来完成阵列探头的扫描控制与缺陷回波的产生。具体工作过程为:根据用户设定的探头参数、缺陷参数及聚焦扫描方式等来初始化 field II;然后由 field II 通过在不同的接通阵元施加具有不同延迟时间(由聚焦法则界定)的电激励信号,产生超声束进入被检试件;经缺陷散射,被探头各阵元接收并转化为电信号;对所有阵元所接收的电信号再施加相应延时并求和,就形成一条 A 扫回波信号。通过持续移动接通阵元,便会展开一组 A 扫回波信号,这些回波信号以.mat 文件格式存储在计算机上,再经包络检波、对数压缩^[8]、DSC 变换等一系列信号处理过程将图像还原出来。

的选择提供参考。

2.2 缺陷参数设置模块

缺陷参数设置模块主要任务有两项:

(1) 模拟缺陷。可模拟两种缺陷:点缺陷和体积缺陷。点缺陷为与被检试件声阻抗不同的一点;体积缺陷为与被检试件声阻抗不同的一空间区域,在这一空间区域取为圆柱形通孔,用随机分布在圆柱形通孔内的离散点表示。可以在缺陷设置模块界面上点击添加点缺陷,输入点缺陷名称、位置信息,如图 5 所示。在缺陷设置模块界面上点击添加体积缺陷,输入体积缺陷的名称、半径及位置信息,如图 6 所示。

(2) 设置检测参数。包括:聚焦方式、扫描方式设置。其中聚焦方式又包括单点聚焦、接收动态聚焦、动态聚焦及变孔径聚焦;扫描方式包括 B 扫描和 S 扫描。如图 7 所示为缺陷设置模块运行界面。

利用离散希尔伯特变换的方法对 A 扫描线进行包络提取,目的是提取回波信号的幅度信息,形成 A 扫描包络文件。由于缺陷的反射、散射等,导致回波信号具有较大的动态范围,因此将回波信号进行对数压缩以使其可以在显示器中显示。最后利用数据插补填充、坐标转换等将 A 扫图像合成 B 扫或 S 扫图像。如图 6 所示,在 x 坐标分别为: -10, -5, 0, 5, 10 mm, z 坐标分别为 30, 40, 50, 60, 70 mm 处设置了 5 个半径为 1 mm 的通孔。图 8 为所设置缺陷的 B 扫描成像图,聚焦方式选择动态聚焦。

如图 9 所示,在 x 坐标分别为: -10, -5, 0, 5, 10 mm, z 坐标分别为 30, 35, 40, 45, 50 mm 处同样设置了 5 个半径为 1 mm 的通孔。图 9 为所设置缺陷的 S 扫成像图,聚焦方式同样选择动态聚焦。

3 结语

在明确超声相控阵检测成像原理及过程的基础上,开发了一款针对超声相控阵检测系统的仿真软

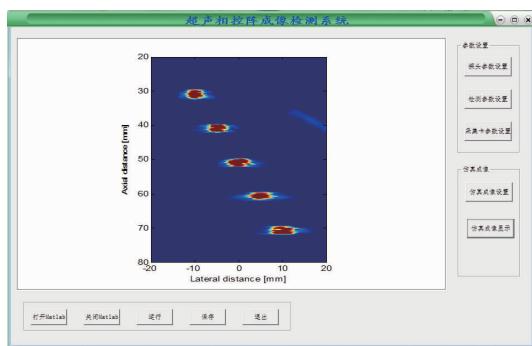


图 8 B 扫描成像

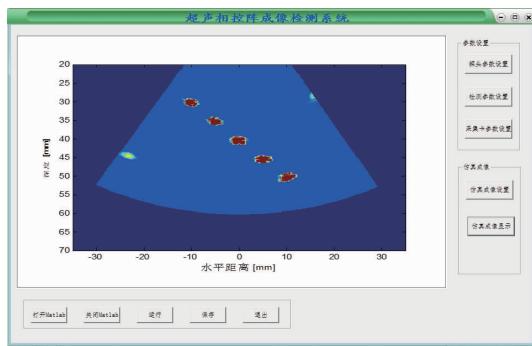


图 9 S 扫描成像

件。将仿真系统分为探头参数设置、缺陷参数设置及仿真成像三大模块。在探头参数模块,可仿真显示相控阵探头的声场声压分布及其指向性特性,通过人机界面改变各探头相关参数,观察声场声压及指向性变化,可分析研究各参数对声场的影响。在

仿真成像模块,利用 field II,建立相控阵探头声场与缺陷相互作用的模型和缺陷回波的计算模型;仿真缺陷试块的相控阵超声成像检测过程,并通过对回波信号包络提取、对数压缩、DSC 变换等一系列信号处理过程将缺陷图像还原出来。

参考文献:

- [1] 张伟志,刚铁,王军.超声波检测计算机模拟和仿真的研究及应用现状[J].应用声学,2003,22(3):39-42.
- [2] 陈建忠,史耀武.超声检测过程的数值模拟[J].无损检测,2001,23(5):198-201.
- [3] MathTools Ltd. MathTools Function Reference Guide [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/cda450383968011ca300919a.html>.
- [4] 张亮,王继阳. MATLAB 与 C/C++混合编程[M].北京:人民邮电出版,2008.
- [5] Shi-Chang Wooh, Yijun Shi. Optimum beam steering of linear phased arrays[J]. Wave Motion, 1999(29):245-265.
- [6] LIN Y, DODSON J M, HAMILTON J D, et al. Theory and experiment for the design of piezoelectric element for phased arrays[C]. Ontario, Canada: Proceedings of 1997 IEEE Ultrasonics Symposium, 1997. 1697-1700.
- [7] 冯若.超声诊断设备原理与设计[M].北京:中国医药科技出版社,1993.
- [8] 冯若,姚锦钟,关立勋,等.超声手册[M].南京:南京大学出版社出版,1999.

(上接第 69 页)

度比较。可见,棒阳极 X 射线+DR 的检测系统不仅所需的管电压低、曝光量少,而且灵敏度也最高。

6 管子-管板角焊缝射线检测标准进展

经过十年的研发和应用,管子-管板射线检测技术日臻成熟。正在修订的标准 NB/T 47013.2(原 JB/T4730.2)已将管子-管板角焊缝射线检测技术与工艺列入标准的附录。该标准预计在 2014 年颁布。

关于管子-管板角焊缝射线检测技术的适用范围,附录规定为:适用于管壳式列管换热器和管壳式反应器的管子与管板角接焊接接头的射线检测。被

检测的管子内径为 10~76 mm,厚度 1.5~5 mm 范围,用于制作焊接接头的金属材料包括非合金钢、低合金钢、合金钢、钛及钛合金、镍及镍合金、锆及锆合金。

标准将管子-管板角焊缝射线检测技术分为 3 个技术等级,分别是 A 级、AB 级和 B 级,对应的检测灵敏度分别为 0.8,0.5 和 0.3 mm 的半球孔。

参考文献:

- [1] 强天鹏,徐卫,陈雁康,等.一种特殊无损检测技术——管子-管板焊缝的射线照相[J].压力容器,2004(1):43-46.