

超声无损检测及实验教学系统的研究与开发*

周晚林^{1,2}, 袁慎芳¹, 王鑫伟¹

(1. 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)
(2. 盐城工学院 基础科学部, 江苏 盐城 224003)

摘 要: 开发了一套超声无损检测计算机集成系统。该系统集测试、控制、数据采集与模式识别于一体, 系统扫查精度高、数字信号采集与处理功能强、有多种图形图像输出模式, 能够用于多种材料结构的无损探伤和缺陷评价, 满足工业产品的质量控制在、新材料研发及无损检测实验教学工作的需要。

关键词: 超声检测; 缺陷; 模式识别; 定量表征; 实验教学

中图分类号: TB553.0426

文献标识码: A

文章编号: 1671-532X(2004)01-0008-04

无损检测(NDT)作为保证产品质量与性能, 稳定生产工艺的重要手段已广泛应用于工业制造领域。其侧重点已从简单的二元(优劣)缺陷检测转向缺陷类型和大小的定量表征, 并与断裂力学等学科相并行形成材料部件过程控制和寿命管理系统。响应这些新的定量需要, 发展了许多新型无损检测方法^[1,2]。

超声探伤以其穿透能力强、对人体无害成为一种适用的无损检测方法。它的根据是高频声波通过试件会被衰减, 最容易检测到的缺陷是分层、夹杂物和表面刻痕, 在铸锻件、焊接件等传统材料的缺陷检测方面已比较成熟。随着复合材料、精细陶瓷等新材料的应用, 评估材料构件的安全性和剩余寿命迫使人们去探索采用若干特殊的超声检测途径。事实上, 以超声导波技术^[3]、声发射技术^[4]、超声应力与残余应力测量技术、超声显微层像技术、非接触超声换能方法^[5]以及超声信息处理与模式识别技术为代表的新型超声检测技术已经出现并正向前发展。另一方面, 观察材料性能和缺陷的扩展是一个渐变的过程, 缺陷的检出能力是一些可估价的参数^[6]。比较完善的定量观测系统应对一些复杂的检测信号与过程作出迅速有效的提取和解读, 以诸如事故或风险之类的具有

统计性质的术语或分布函数来表征, 最终评定缺陷影响的临界状态, 确定是否可用的判据, 规定可行的修复程序。这些需求迫使传统的超声设备相继退役, 急需开发新型的能集测试、控制、数据采集与模式识别于一体的多功能超声测试系统。

本实验室采用先进的超声集成板卡、换能器等硬件, 从复合材料、精密陶瓷等新材料缺陷检测和定量表征出发在硬件上加以改进完善, 并结合计算机数据处理与图像识别技术, 开发出一套完整的超声无损检测系统。该系统功能齐全、自动化程度高、扫查精度高、采用了开放式软件系统, 能够用于复合材料、精密陶瓷等新型材料的缺陷检测和定量评价。

1 系统硬件设计与集成

系统硬件由工业控制机(IC610)、步进电机控制箱(MCB)、试件扫查箱(TRNK)和换能器(T)等几部分组成。其构成框图如图 1 所示。插在主机板总线 VISA 槽上的步进电机控制卡(SMCB)用于控制装于试件扫查箱上的步进电机在 X、Y、Z 三个方向上的位移, 使换能器能在空间上准确定位。脉冲发射与接收卡(IPR-100)控制超声波发射与接收。数模转换卡(AD-500)实现缺陷回波信号

* 收稿日期 2003-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10072026)、航空科学基金资助项目(01G52041)

作者简介: 周晚林(1964-), 男, 盐城工学院基础科学部副教授, 博士, 主要研究方向为实验力学及智能材料结构。

的数字化采集处理。在结构上,试件扫描箱由铝合金和 15 mm 厚的有机玻璃板胶接而成,底部留有进排水管方便液体耦合介质的灌入与排出。箱脚装有滚轮使箱体移动方便。另外,设计了一套定位夹具以便不同形状的零部件准确定位。换能器采用通用的螺旋接头,并配有球形旋转接杆,可以绕 X、Y、Z 轴旋转沿试件任意方向扫查。通过中间机械手式接杆连接空气耦合换能器可应用于对在役部件的主动在线监测。硬件系统的主要技术参数为:

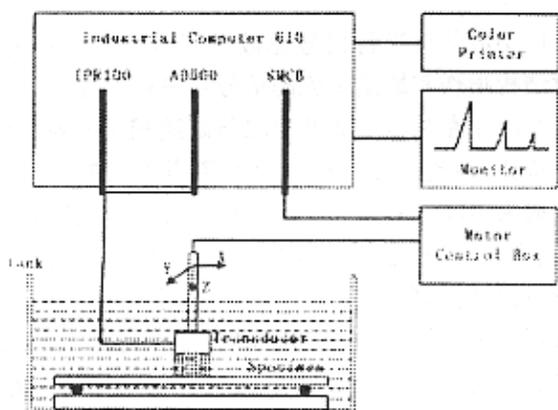


图 1 系统硬件框图

Fig. 1 The setup for the hardware system

- ① 扫查试件最大尺寸: 1000 L × 700 W × 500 H (mm)。
- ② 扫查速度: X、Y 向最大 127, Z 向最大 32 (mm/s)。
- ③ 步进电机: 最大步进数 16 million, 最大步进速率 12500 steps/sec。
- ④ 发射电脉冲范围 50 ~ 400 (V)。
- ⑤ 可选用换能器的工作频率 5, 10, 15, 20, 50 (MHz)。
- ⑥ 换能器接收频宽 0.8 ~ 10 (MHz)。
采样频率 3.9 ~ 50 (MHz)。

2 软件系统功能与实现

2.1 系统硬件设置模块

该模块对步进电机控制卡、脉冲发射与接收卡、模数转换卡等系统硬件参数进行设置。控制步进电机的主要参数有: 扫查轴向、位移量、速度分辨率等。脉冲发射与接收卡的设置参数包括脉冲接收方式(反射/穿透)、脉冲强度、衰减、阻尼、滤波及增益量值等。有关数据采集的选择参数包括扫描延迟、信号均值、采样速率(一般至少取换

能器工作频率的 10 倍)、信号显示模式和比例等。

2.2 信号发射与接收模块

该模块设置脉冲强度参数及发射电路方式(调谐式与非调谐式)选择开关。发射强度亦可通过改变阻尼电路参数改变。接收部分控制衰减阻尼及增益大小。A 型显示波形有射频显示(不检波显示)和视频显示(检波显示)两种形式。前者利于分析回波的波形和特征,后者图形清晰简单。

2.3 数据采集处理模块

数据采集借助高速 A/D 和大容量高速存储器存储全部回波信息,能实时提供缺陷的当量、位置等信息以及显示、存储和回放存储的回波波形,对回波进行逐点分析。采集频率可预先选择。为实现 C 型显示还设计了闸门开关设置,根据 A 型显示的缺陷回波,预置门限值及闸门起点和宽度。设有 Z 变换、FFT 变换以及非线性 AR 模型、小波分析等功能键用于信号的频谱分析。这里,着重介绍一下几个主要的谱分析方法。

2.3.1 基于 FFT 的谱分析^[2]

设有一周期信号 $x(t)$ 的周期为 T , 则其傅里叶序列为

$$x(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi f_n t + b_n \sin 2\pi f_n t) \quad (1)$$

式中, a_0 、 a_n 、 b_n 为傅里叶系数; f_n 是各次谐波的频率。

对于某一瞬态信号(常规的超声检测信号一般可认为是有限时间的瞬态信号)可设定其周期 T 趋向无穷大,这时序列可化为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Y(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

这时傅里叶系数变为连续的频率函数

$$Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

如果将信号 $x(t)$ 经 A/D 采样变成数字信号序列 $x(n)$, 则对照 (3) 式可得到其离散傅里叶变换

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} kn) \quad (4)$$

式中, n 、 k 是序列号, N 为数字信号序列的点数,一般 $Y(k)$ 是复数,对其取模运算即构成 $x(n)$ 的离散化频谱。

2.3.2 AR 模型谱分析^[2,7]

ARMA 模型是动态系统借助时序分析导出的具有物理意义的随机差分方程模型。设 $X(t)$ 和

$X(t)$ 分别表示线性平稳系统的输入和输出在采样时刻的数值,联系 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的向前差分方程可写为下列对称形式的 ARMA(p, q) 模型:

$$Y_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i Y_{t-i} = X_t - \sum_{j=1}^q \theta_j X_{t-j} \quad (5)$$

式中 φ_i, θ_j 分别是自回归参数和滑动平均参数, 其个数分别取决于差分方程的自回归阶次 p 和滑动平均阶数 q 。作为 ARMA(p, q) 模型的特例, 当 $\theta_j = 0 (j=1, 2, \dots, q)$ 时, 模型中没有滑动平均部分, 则有

$$Y_t = \sum_{i=1}^p \Phi_i Y_{t-i} + X_t \quad (6)$$

称为 p 阶自回归模型, 记为 AR(p) 模型。它可以看作是一种线性预测模型, 可由已知的信号不断外推, 获得未知区域的预测数值。由这种模型获得的信号功率谱为

$$S_{AR}(\omega) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p \alpha_k \exp(-j\omega K) \right|^2} \quad (7)$$

式中 σ^2, α_k 是待求系数, 可由 Yule - walker 方程求出:

$$\begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(p) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(p-1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(p) & R(p-1) & \dots & R(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma^2 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

从(7)式可知 $S_{AR}(\omega)$ 是连续谱, 有较高的分辨率。AR 模型谱估计的特点是对瞬态短时间信号处理有优势, 可以获得明晰光滑的频谱图。

2.3.3 小波分析^[8]

由多分辨分析原理, $f(t) \in L^2(R)$ 可由尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\Psi(t)$ 展开为

$$f(t) = \sum_{j=j_0+1}^{j_m} \sum_k d_x(j, k) \Psi_{l, k}(t) + \sum_k c_x(j_m, k) \varphi_{l_m, k}(t) \quad (9)$$

$$d_x(j, k) = \int f(t) \bar{\Psi}_{l, k}(t) dt$$

$$c_x(j, k) = \int f(t) \bar{\Psi}_{l_m, k}(t) dt \quad (10)$$

其中 $\Psi_{l, k}(t) = 2^{-l} \Psi(2^{-l}t - k)$ ($j = j_0, \dots, j_m, k \in Z$); $\varphi_{l_m, k}(t) = 2^{-l} \varphi(2^{-l}t - k)$ ($k \in Z$)。 j 为尺度因子, k 为位移因子。小波系数 $d_x(j, k)$ ($j = j_0 + 1, \dots, j_m$) 和尺度系数 $c_x(j_m, k)$ 称为 $f(t)$ 的离散小波变换, 小波系数和尺度系数可由 Mallat 算法得

到。由 Parseval 恒等式, 式(10)定义的离散小波变换可写成

$$d_x(j, k) = f(t), \Psi_{l, k}(t) = \frac{1}{2\pi} f(\omega), \hat{\Psi}_{l, k}(\omega) \quad (11)$$

$$c_x(j_m, k) = f(t), \varphi_{l_m, k}(t) = \frac{1}{2\pi} \hat{K}(\omega), \hat{\varphi}_{l_m, k}(\omega) \quad (12)$$

其中 $f(\omega), \hat{\Psi}_{l, k}(\omega), \hat{\varphi}_{l_m, k}(\omega)$ 分别为 $f(t), \Psi_{l, k}(t), \varphi_{l_m, k}(t)$ 的傅里叶变换。在本系统中, 主要利用小波分析进行信号滤波并提取一些特殊的、对结构损伤和缺陷敏感的信号带进行研究。

由于在频域上能够提取与缺陷相关的各种信号特征, 因此谱分析技术使得超声检测的定量表征成为可能。基于 FFT 的线性谱分析方法因其简洁、实用, 已在超声共振测厚、超声检测粘接件质量、材料内部微结构以及混凝土质量评价等方面得到应用。但由于 FFT 运算受离散点的限制, 获得的频谱图有时会有起伏, 使其分辨率往往较低。与 FFT 相比, 以 AR 模型谱分析为代表的非线性谱分析方法受 A/D 转换频率的影响要小得多, 对采样分析点数要求较少, 有较高的分辨率, 适合于脉冲超声检测^[2]。近年来发展的小波变换技术, 具有多分辨率 (Multi-resolution) 分析和在时-频两域都可表征信号局部特征的优点, 因而在瞬态信号检测、随机噪声抑制、脱粘界面检测^[9]等方面具有明显的优势。文献[8]采用小波神经网络实现了蜂窝层合结构冲击损伤的监测。尽管谱分析方法在超声检测方面已经得到很多应用, 但对一些新材料新结构要真正走向实用, 仍依赖于缺陷波散射理论的研究和指导^[10]。

2.4 扫查结果输出模块

该模块可实现扫查结果的 A 型、B 型、C 型显示。图 2 是多孔金属试块的 C 扫图像。扫查图形以图像文件存贮。关于测试参数、缺陷位置及大小的报告以数据文件存贮或打印输出。

2.5 数字图像处理模块

该模块设计成开放式, 对扫查图像按回波大小量化成具有灰度等级的数字图像, 可以实现图像的平滑、增强、滤波和去噪等功能处理。结合计算机数字图像处理技术, 能实现试件缺陷的三维显示。但由于材料内部缺陷几何特征的复杂性, 此项功能还有待进一步的研究。

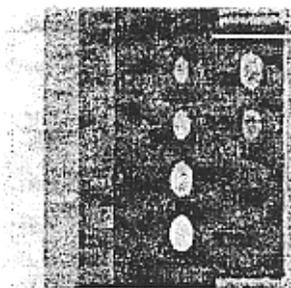


图 2 多孔金属试块的 C 扫图像

Fig. 2 The C scan image of the metal block with holes

3 结束语

(1) 超声检测作为一种无损检测技术,其最终目的是评估材料构件的安全性和剩余寿命。本文介绍的超声检测计算机集成系统集测试、控制、数据采集与处理于一体,能够满足工业生产中产品的质量控制和新材料研发及超声无损检测实验教

学工作的需要。

(2) 无损评价是超声检测的发展方向。其难点是缺陷的定量表征。数字信号处理与模式识别是解决这一问题的关键技术。本系统设计的软件开放式平台,可以吸收超声信号处理与模式识别方面的最新方法,及时应用于工业及高新技术产业中。

(3) 应用计算机图形图像技术能够使得超声检测的结果更直观、更可靠。本系统将 C 扫图像按回波大小量化成具有灰度等级的数字图像,为超声检测的信号分析和缺陷的三维几何表征开辟了新的途径。当然,缺陷的定量分析是检测声学上的难点,这方面有待进一步的研究。

(4) 随着空气耦合等非接触超声换能方法的发展,本系统完全可以用于工业生产中材料部件的实时在线监测,其应用前景非常看好。

参考文献:

- [1] 刘镇清,刘骁. 超声无损检测的若干进展[J]. 无损检测, 2000, 22(9): 403 - 405.
- [2] 刘镇清,陈广. 超声无损检测中的谱分析技术[J]. 无损检测, 2001, 23(2): 85 - 88.
- [3] Rose J L. Ultrasonic guided wave inspection concepts for stem generator tubing[J]. Material Evaluation, 1994, 52(2): 307 - 311.
- [4] Gorman MR, Prosser WH. Plate wave acoustic emission[J]. Journal of Acoustic Emission, 1991, 9(1): 358 - 364.
- [5] 王兆球,张淑仪. 高频空气超声换能器研究现状与展望[J]. 应用声学, 1992, 11(2): 1 - 5.
- [6] Georgiou G A. Ultrasonic techniques for sizing flaw length[J]. British Journal of NDT, 1991, 545 - 548.
- [7] 周晚林,王鑫伟,袁慎芳. 基于主动监测系统的 AR 模型谱分析方法[J]. 力学与实践, 2003, 25(3): 48 - 50.
- [8] 袁慎芳,朱晓荣,陶宝祺,等. 应用应力波技术的蜂窝结构损伤监测[J]. 数据采集与处理, 2000, 15(4): 486 - 490.
- [9] 张建生,李明轩. 脱粘界面超声检测信号的小波多分辨率分析与重构[J]. 声学学报, 2001, 26(3): 31 - 37.
- [10] 毛捷,简晓明. 信号处理在超声检测中的应用[J]. 应用声学, 2000, 19(3): 45 - 48.

Research and Development of Ultrasonic System for Non - destructive Testing and Experimental Teaching

ZHOU Wan-lin^{1,2}, YUAN Shen-fang¹, WANG Xin-wei¹

(1. The Aeronautical Science Key Lab for Smart Materials and Structures, NUAA, Jiangsu Nanjing 210016, China)
(2. Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224002, China)

Abstract: An ultrasonic non - destructive testing system integrated with computer has been developed. It has abilities in testing, control, digital signal processing and pattern recognition. High scanning precision, powerful function of signal acquisition and several output figures can be gained. The system will find uses in the non - destructive testing and flaws evaluation of materials.

Keywords: ultrasonic testing system; flaws; pattern recognition; quantitative evaluation; experimental Teaching