

基于高速摄像识别定位的手动超声可视化检测系统研究

罗 明 马兆庆 张 颖 肖轲迪 支 凡

(航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

文 摘 针对手动检测中存在检测精度低、人为因素对检测结果影响大、检测结果不直观等问题,采用超声脉冲反射法,开展基于高速摄像识别定位的手动超声可视化检测技术研究,实现高速图像传输、识别定位、C扫描显示软件研制,构建手动超声可视化检测系统平台,利用碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)试样进行验证。结果表明:该系统图像处理速度较快,检测速度可达200 mm/s;该系统检测精度较高,可检出CFRP试样中 $\Phi 2$ mm以上大小的缺陷,横向位置分辨力约为1 mm;该系统操作性强,适用广泛,结果准确,可靠和直观。

关键词 超声检测,高速摄像,定位,手动,C扫描显示

中图分类号:TP273.5

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.04.013

Research of Manual Ultrasonic Visualization Detection System Based on High Speed Camera Recognition and Location

LUO Ming MA Zhaoqing ZHANG Ying XIAO Kedi ZHI Fan

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract To address issues such as low detection accuracy, significant influence of human factors on detection results, and lack of intuitiveness in detection outcomes in manual inspection, this study employs ultrasonic pulse reflection technology to develop a manual ultrasonic visualization inspection technique based on high-speed camera recognition and localization. The research focuses on achieving high-speed image transmission, recognition and localization, and the development of C-scan display software, thereby establishing a manual ultrasonic visualization inspection system platform. The system is validated using carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) specimens. The results indicate that the system has a fast image processing speed, with a detection speed of up to 200 mm/s; the system has high detection accuracy, capable of detecting defects larger than $\Phi 2$ mm in CFRP specimens, with a lateral position resolution of approximately 1 mm; the system is highly operable, widely applicable, and provides accurate, reliable, and intuitive results.

Key words Ultrasonic test, High-speed camera, Location, Manual, C-scan show

0 引言

超声无损检测技术被广泛应用于航空航天产品的质量检测中,已成为产品研制生产流程中非常重要的一环^[1-3]。超声检测按照操作方式可分为手动检测和自动检测。手动检测时,人手持探头在工件表面移动扫查,一边扫查一边观察探伤仪器显示的波形变化,并根据波形特征判断是否存在缺陷。若发现缺陷,再由人根据缺陷波形的特征在产品表面画出缺陷位置和大小,依据该结果出具检测报告。

虽然手动检测具有操作简单、适用广泛的优点,但也存在以下不足:首先,手动检测的过程和结果受人为因素的影响较大,在检测过程中,人的眼睛要一直盯着探伤仪器,难以顾及探头移动的扫查行距、扫查速度,只能靠人的感觉,扫查均匀性很难保证,漏检、误判风险较大,这对检测人员的专业素质和经验要求较高;其次,手动检测结果以波形图形式呈现,检测人员根据波形特征画出缺陷形状和大小,因波形图不直观,缺陷细微变化不容易发现,且波形无法保存

收稿日期:2023-07-18

第一作者简介:罗明,1983年出生,高级工程师,主要从事超声成像技术研究工作。E-mail:121322830@qq.com

和溯源,一旦出现问题,难以对检测过程进行追溯;最后,手动检测效率低,由于人的眼睛识别波形变化快慢的能力有限,手动扫查时速度不能太快,通常不超过 100 mm/s,而自动检测时速度可达 300 mm/s。

针对目前手动超声检测存在的问题,开展手动超声可视化检测技术的研究,利用手动检测和自动检测的优势,取长补短,既保留手动检测的操作性强、适用广泛的优点,也保留自动检测的准确性高、可靠性高和直观性等优点。目前,手动超声可视化检测技术主要集中基于相控阵滚轮定位^[4]、基于 CCD 视频图像定位^[5]以及基于角编码器定位或多探头超声波定位法^[6]等的研究和应用。本文研究一种基于高速摄像识别定位的手动超声可视化检测系统(下面简称系统),拟利用高速摄像机对检测含超声波探头的视场进行每秒上千帧拍摄,依靠计算机图像识别算法,实现探头快速识别和探头定位的功能,并与采集的超声信号结合,完成超声 C 扫描图像绘制,最终实现超声手动可视化检测。

1 系统总体设计

该系统包括以工控机、高速摄像机、图像采集卡、超声信号发生器(或探伤仪)、超声信号采集卡、探头和圆形 LED 发光二极管为主的硬件系统,基于 Win7 版本以上操作系统并基于 VC++ 开发的软件系统。该系统的工作原理是通过高速摄像机实现高速图像采集和传输,实时读取高速摄像机的图像信息,并快速识别图像中探头位置,同时利用超声信号采集卡采集超声信号,计算机将实时获取的位置信号和超声信号进行 C 扫描绘图,实现可视化的检测结果。

1.1 硬件系统

系统包括的硬件有工控机,可编程高速摄像机,图像采集卡,超声信号发生器(或探伤仪),超声信号采集卡,探头,圆形 LED 发光二极管,相机支架,工作台,以及数据线若干。硬件结构和工作流程如图 1 所示。

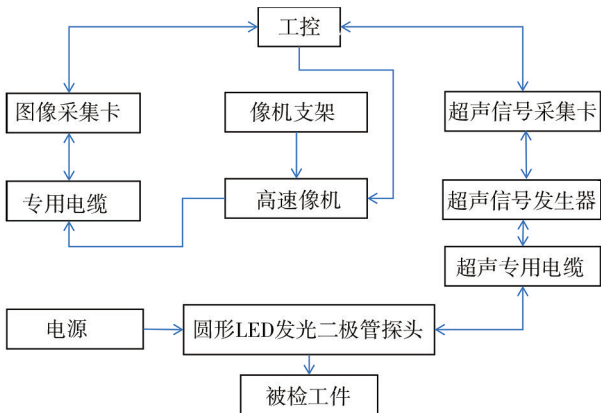


图1 可视化检测系统硬件系统

Fig. 1 Hardware composition of visual inspection system

系统工作流程分为两条主线:主线1是工控机控制高速摄像机对带有圆形 LED 发光二极管作为识别体的探头所在的视场进行高速摄像拍摄,利用图像采集卡进行图像采集,工控机对接收到图像进行图像处理,快速识别并确定出探头位置;主线2是工控机控制超声信号发生器发生电脉冲,激发探头产生超声波,与被检件作用后,探头接收到的超声信号原路返回,并由超声信号采集卡对信号进行采集。工控机根据主线1接收到的探头位置信号后触发主线2启动,并接收到超声信号进行 C 扫描成像,实现可视化检测。为保证探头位置信号与超声信号对应,扫描速度、C 扫描图中每个像素点代表的实际距离、图像的处理帧率、信号卡的采样率等参数应同时满足式(1)~式(2):

$$\frac{V}{d} < n f_p \tag{1}$$

$$\frac{V}{d} < n f_s \tag{2}$$

式中, V 表示扫描速度, d 表示 C 扫描图中每个像素点代表的实际距离, f_p 表示图像的处理帧率, f_s 表示信号卡的采样率, n 表示大于 1 的浮动系数,为了保证位置信号和超声信号相对应, n 一般大于 2。

1.2 软件系统

在 Win7 环境下,利用 VC++ 语言开发的手动超声可视化检测软件系统,该软件系统主要包括图像采集,图像识别,信号采集,图像绘制等部分,软件系统运行流程如图 2 所示。

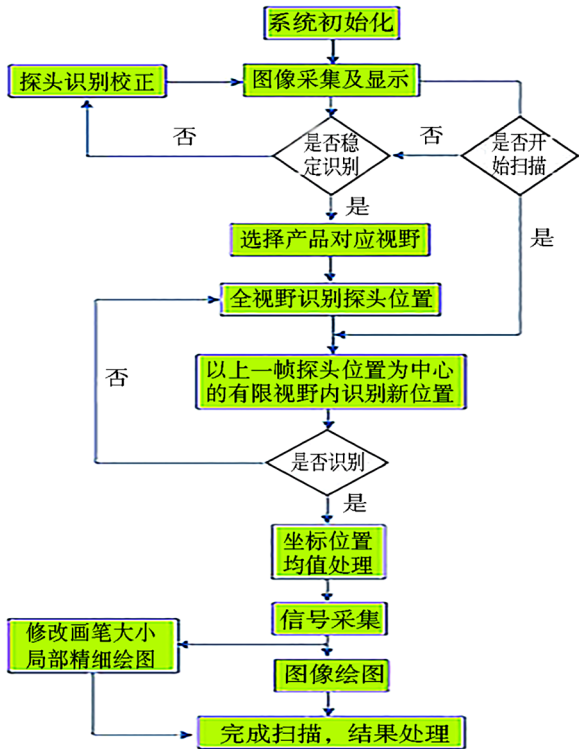


图2 软件系统运行流程示意图

Fig. 2 Software flow diagram

图2所示的软件系统运行流程大致如下:系统初始化后开始图像采集和显示,调整探头识别参数,实现探头的稳定识别,选择产品对应的视野区,开始扫描后,首先在全视野内识别探头位置,然后在下一帧图像中,以上一帧探头位置为中心的有限视野内识别新位置,如果在有限区域内未识别出探头位置,则返回全视野进行识别,如此往复。当识别成功后,将

识别后的有限个坐标值放入容器内,进行均值处理,同时采集超声信号,进行绘图。如果发现缺陷,可将画笔改小进行局部精细绘图。

1.2.1 探头位置识别

摄像机位于探头上方,从摄像机看,探头的形状近似为圆形,探头识别采用霍夫圆识别原理^[7-10],其原理如图3所示。

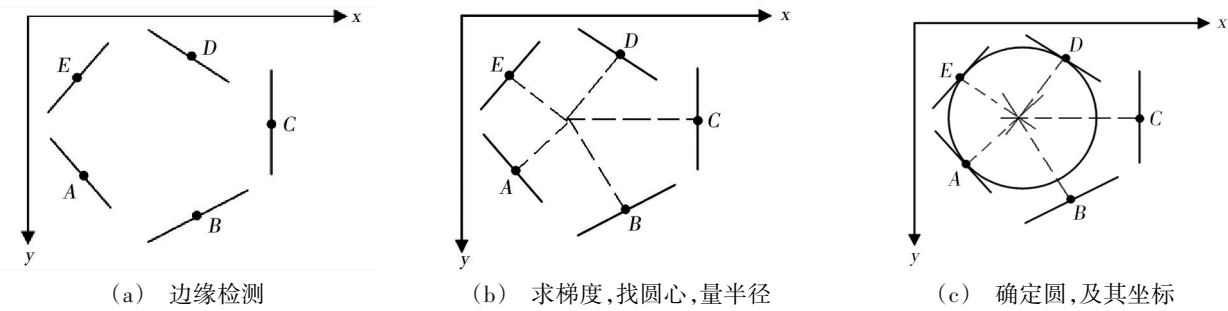


图3 霍夫圆识别原理

Fig. 3 Hough circle recognition principle

二值图滤波后进行边缘检测、边缘像素求梯度,对通过梯度方向上的点进行累加计数,计数最多的点可认为是圆心,然后对圆边缘像素点进行累加计数,计数最多的点对应的长度可认为是半径,进而确定探头的圆心、圆形坐标位置。

在霍夫圆识别过程中,梯度计算会受到图像椒盐噪声干扰,导致边缘检测不精确,识别出的探头位置会在一定范围内波动,如果以此进行扫描,画笔会变宽,影响检测横向分辨率,为了提高探头位置识别的准确性,设计了均值处理程序,如图4所示。将一定数量的坐标值进行均值处理后,探头位置波动性大大降低,识别准确性提高,如图5所示。但均值处理是以牺牲一定程度的检测速度为前提的,处理的坐标值越多,检测速度越慢。



图4 均值处理容器

Fig. 4 Average processing container

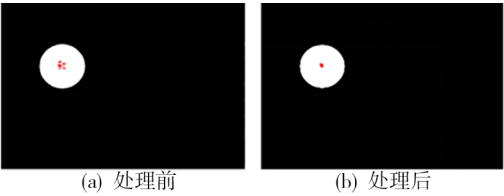


图5 均值处理前后对比

Fig. 5 Comparison before and after average processing

为了提高探头识别速度,除了在探头上设计圆形LED发光二极管标识外,还设计了二种方式:第一,先在像机全幅图像中找到探头位置,然后在后续

帧图像中以该点为中心的有限区域(一般是探头直径的3倍左右)内识别探头位置,由于每帧的搜索范围大大缩小,探头识别速度相比全图识别时也大大提高;第二,将像机画幅进行分割,检测视场形成若干区域,逐个区域扫描,此时像机的拍摄帧率会成倍提高,从而提高探头识别速度。

1.2.2 图像记忆模式

在手动超声检测时,已扫区域可能被反复扫描,图像被反复覆盖,为防止同一位置因耦合不稳定,出现后面低信号覆盖前面高信号,造成缺陷漏检和误判,在软件中设置信号记忆模式,可记忆该位置出现过的最高信号,以最高信号绘图,从而保证检测结果的准确性。

1.2.3 图像标定

摄像机距离工件的高度决定了工件在采集图像中的像素大小,高度值越大,工件在采集图像中的像素越小,因此,为保证工件对应像素大小与实际尺寸大小进行一一对应,提高检测图像绘制的准确性,在开始扫描之前需要对像素和实际尺寸进行标定,标定方法就是将已知大小的工件放在视野中,然后用鼠标框选工件,工件与摄像机的空间摆放位置需保证框选的矩形框与工件相应边平行,矩形框大小刚好把工件选中即可,此时软件会计算出矩形像素大小和工件尺寸大小的比值,完成标定。在识别出探头坐标位置后,应按照该比值进行转化,得到探头在工件中的实际位置值,由该值绘制的C扫描图像与工件尺寸才是一致的。通过标定后的画笔大小与实际工件尺寸一致,比如说画笔大小5 mm,表示每画一

行实际扫查宽度为 5 mm。为了提高绘图的准确性,画笔大小具有可调节功能,可先用大画笔粗扫,发现缺陷后再将画笔调小,进行局部范围内的细扫,并对局部区域进行图形重绘。

2 试验

2.1 试样制备

在 440 mm×240 mm×3 mm 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)中加工孔深 1 mm,直径 $\Phi 2$ mm~ $\Phi 7$ mm 大小人工平底孔缺陷(图 6)试样经热压罐固化成型。利用该试样来验证系统的检测精度和横向位置分辨力。

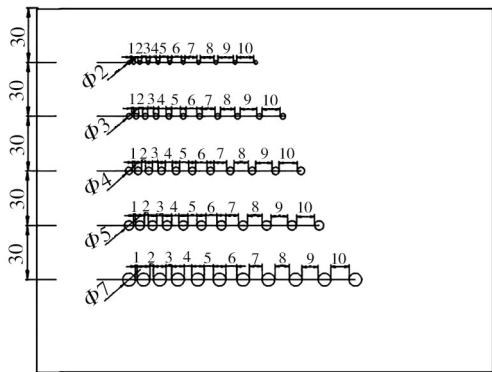


图 6 CFRP 人工平底孔试样示意图

Fig. 6 Schematic diagram of CFRP artificial flat bottom hole sample

2.2 测试方法

采用了 10 MHz、晶片直径为 10 mm 的聚焦探头、超声脉冲反射法进行手动可视化检测。为了提高检测分辨力,设计了如图 7 所示的空腔延迟块,使用时空腔部分注满水,与工件接触的一端粘贴耐磨的聚酰亚胺薄膜。延迟块高度与探头焦距相当,使焦点位于检测面,可有效提高发现小缺陷的能力。

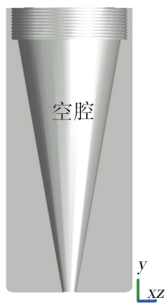


图 7 空腔延迟块

Fig. 7 Cavity Delay Block

扫描时可先将画笔大小设置为不超过探头晶片直径的 1/2 大小(本实验设置为 4 mm)进行粗扫,待发现缺陷后,将对应区域图像清零,然后将画笔大小改小(本实验设置为 1 mm)进行细扫,可实现对缺陷轮廓进行精确绘制。扫描方式和传统的手动扫描方式一样,探头扫描的区域才绘图,未扫描的地方不绘

图,利用该系统可对手动扫描过程进行控制,避免人为漏检。

2.3 表征

(1)可视化

利用该系统对 CFRP 试样进行超声检测,将检测结果以 C 扫描图像呈现,可从图像中考察可检出的最小直径缺陷来表征系统的检测能力,考察可分辨两缺陷的最小间距来表征系统的横向分辨力。

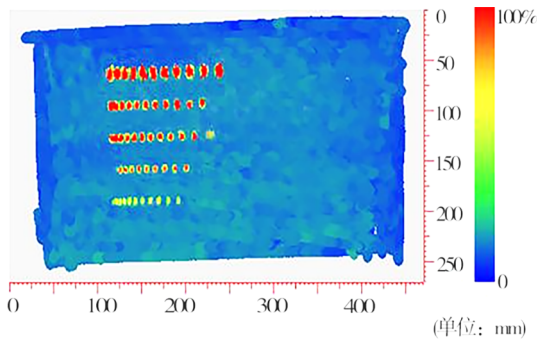
(2)检测速度

检测速度是系统处理能力的重要指标,可将探头及圆形 LED 发光二极管固定在自动扫描装置上。设置扫描速度为 100、150、200 mm/s,然后将高速摄像机对准探头视场在不同速度下扫描成像,观察不同速度下,试样中缺陷是否能够有效检出,是否存在差异,以此来表征系统的处理能力,并指导手动检测时,采用的检测速度应满足的要求。

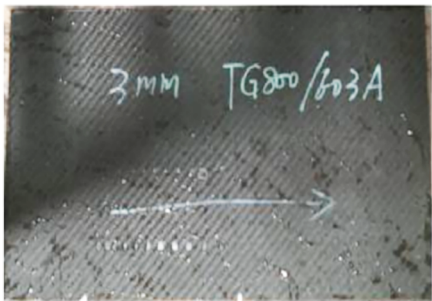
3 结果分析和讨论

图 8 是利用本系统检测得到的手动扫描图像,该图像能同时记录 C 扫描结果[图 8(a)]和实物拍照图像[图 8(b)]。从 8 图可以看出该系统能够检出试样中 $\Phi 2$ mm 以上大小的缺陷,横向位置分辨力约为 1 mm。

不同扫描速度对检测结果的影响结果如图 9 所示。图中左侧为人工平底孔试样 C 扫描图,右侧为



(a) C 扫描图像



(b) 碳纤维复合材料

图 8 手动超声 C 扫描结果及实物图像

Fig. 8 Manual ultrasonic C-scan results and physical images

检测时的实物图。从结果可以看出,速度到200 mm/s时扫描结果与100 mm/s时扫描结果基本一致,均能将缺陷检出,说明本系统的处理速度满足200 mm/s的检测速度要求。

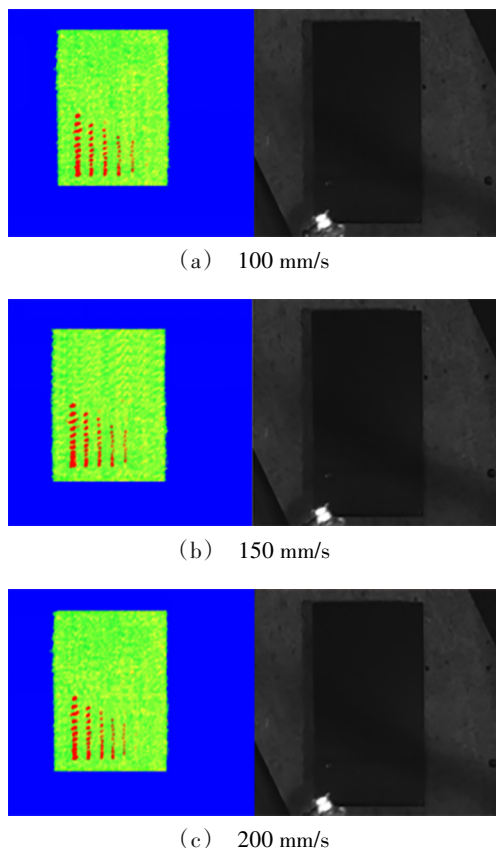


图9 不同扫描速度时的C扫描结果
Fig. 9 C-scan results at different scanning speed

4 结论

基于高速摄像识别定位,用VC++开发了手动超声可视化检测系统,突破了高速图像传输、识别等软件设计的关键技术,搭建了手动可视化超声检测系统。该系统图像处理速度较快,可以满足检测速度达到200 mm/s的要求;该系统检测精度较高,可检出CFRP试样中 $\Phi 2$ mm以上大小的缺陷,横向位置分辨力约为1 mm;本系统操作性强,适用广泛,结果准确,可靠和直观等。

参考文献

- [1] 陈金根. 复合材料制品的超声检测[J]. 无损探伤, 1995(05):1-8.
CHEN Jingen. Ultrasonic testing of composite products[J]. Nondestructive Inspection, 1995(05):1-8.

- [2] 周正干. 航空航天领域中先进超声检测技术的发展和应

- 用[J]. 航空制造技术, 2018, 61(19):34-44.
ZHOU Zhenggan. Development and application of advanced ultrasonic testing technology in aerospace [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(19):34-44.

- [3] 徐丽. 航空航天复合材料无损检测研究现状[J]. 材料导报, 2005, 19(8):79-82.

- XU Li. Review of NDE of composite materials in aerospace fields[J]. Materials Report, 2005, 19(8):79-82.

- [4] 付汝龙, 陈建华, 林丹源, 等. 复合材料的相控阵超声C扫描成像检测[J]. 无损检测, 2015(05):38-41.

- FU Rulong, CHEN Jianhua, LIN Danyuan, et al. Phased array ultrasonic C-scan imaging testing of the composite materials [J]. Nondestructive Testing, 2015(05):38-41.

- [5] 张锐, 陈以方, 骆巍, 等. 复合材料手动超声成像检测系统的研究[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(03):54-58.

- ZHANG Rui, CHEN Yifang, LUO Wei, et al. Manual-scan ultrasonic imaging system for testing of composite materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2002, 32(03):54-58.

- [6] 高晓进. 手动超声C扫描检测系统及方法[P]. CN 202110862882. 2.

- GAO Xiaojin. Manual ultrasound C-scan system and method [P]. CN 202110862882. 2.

- [7] 王元宝, 郝燕. 基于霍夫变换的球状TEM图像的识别方法[J]. 化学教育(中英文), 2019, 40(22):79-81.

- WANG Yuanbao, HAO Yan. A recognition method for spherical TEM images based on hough transform [J]. Chemistry Education(Chinese and English), 2019, 40(22):79-81.

- [8] 顾筠. 基于霍夫变换和几何特性的图像识别方法[J]. 自动化博览, 2007, 24(04):3.

- GU Yun. Image recognition method based on Hough transform and geometric characteristics [J]. Automation Panorama, 2007, 24(04):3.

- [9] 李佳蔚, 张瑞麟, 甘雨. 一种基于最长边提取和霍夫变换的图像空间校正方法[J]. 电子技术与软件工程, 2018(10):2.

- LI Jiawei, ZHANG Ruilin, GAN Yu. An image spatial correction method based on longest edge extraction and hough transform [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(10):2.

- [10] 高会军, 靳万鑫, 腾军, 等. 一种基于改进霍夫变换的图像位置配准方法[P]. CN201610872893. 8.

- GAO Huijun, JIN Wanxin, TENG Jun, et al. An image position registration method based on improved Hough Transform [P]. CN201610872893. 8.