

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518354

激光超声法零件缺陷在线自动检测系统研究^{*}郭 森^{1,2} 赵纪元² 原可义^{1,3} 颜江涛⁴ 王琛玮⁵

(1. 国家市场监督管理总局重点实验室(无损检测与评价) 北京 100029; 2. 北京信息科技大学自动化学院 北京 100192;
3. 中国特种设备检测研究院 北京 100029; 4. 上海航天精密机械研究所 上海 201600;
5. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘 要: 针对增材打印、航空发动机叶片等工业生产过程及复杂构件内部存在杂质、孔洞、裂缝、残缺等缺陷的高效、高分辨率、非接触检测需求,提出宽频带激光超声信号模态分离方法,通过阵列信号时域平均降噪法、改进的经验模式分解算法、宽频带信号多特征分析的小波降噪方法、变分模态分解算法的有效结合,实现激光超声信号的降噪、特征增强与模态分离。采用传统超声 B 扫、C 扫成像以及合成孔径聚焦成像算法,实现缺陷的二维高精度成像。在时空动态扫描形成三维矩阵的基础上,实现缺陷的三维定量显示。研制五轴机床高精度扫查式、机械臂自由扫查式两套激光超声缺陷在线检测系统,采用基于光干涉的高精度超声阵列传感器以及电磁超声传感器两种信号检测方式,设计四种预置缺陷模拟试块包括平底孔、横通孔、表面裂纹以及内部裂纹进行前期验证。实际叶片、涡轮盘缺陷检测结果表明系统可有效检测大小为 0.1 mm 的缺陷,缺陷尺寸误差在 10% 以内,位置误差小于 0.3 mm。研制的激光超声检测系统成熟度达到 6 级,在航天、航海、核电、轨道交通、压力容器与管道、有毒气体容器与管道等领域具有进一步推广和应用价值。

关键词: 激光超声;缺陷检测;五轴机床;机械臂;合成孔径聚焦成像

中图分类号: TN0;TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Research on on-line and automatic measurement system of part defects
using laser ultrasonic techniqueGuo Miao^{1,2} Zhao Jiyuan² Yuan Keyi^{1,3} Yan Jiangtao⁴ Wang Chenwei⁵

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing and Evaluation, State Administration for Market Regulation, Beijing 100029, China;
2. College of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
3. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China; 4. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China; 5. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the high-efficiency, high-resolution and non-contact measurement requirements for impurities, holes, cracks and imperfections in industrial production processes such as additive printing, aeroengine blades and complex components, a wideband laser ultrasonic signal modal separation method is proposed. Through the effective combination of array signal time-domain average denoising method, improved empirical mode decomposition algorithm, wavelet denoising method for wideband signal multi feature analysis, and variational mode decomposition algorithm, the denoising, feature enhancement and modal separation of laser ultrasonic signals are achieved. Traditional ultrasound B-scan, C-scan imaging, and synthetic aperture focusing imaging algorithms are used to achieve high-precision two-dimensional imaging of defects is achieved. Based on forming a three-dimensional matrix through spatiotemporal dynamic scanning, three-dimensional quantitative display of defects is achieved. Two sets of laser ultrasonic defect measurement systems with high precision scanning type for five-axis machine tools and free scanning type for robot arms are developed. High-precision ultrasonic array sensors based on optical interference and electromagnetic ultrasonic sensor are designed. Four preset defect simulation test blocks are designed, including flat bottom holes, transverse through holes, surface cracks, and internal cracks, for preliminary verification. The actual blade and turbine disk defect detection results show that the system can effectively detect defects with a size of 0.1 mm, with a defect size error of less than 10% and a position error of less than 0.3 mm. The maturity of the developed laser ultrasonic detection system has reached level 6, and it has further promotion and application value in fields such as aerospace, navigation, nuclear power, rail transportation, pressure vessels and pipelines, toxic gas containers and pipelines, etc.

Keywords: laser ultrasonic; defect detection; five-axis machine tool; robotic arm; synthetic aperture focusing imaging

0 引 言

为了保证工业生产质量和关键部件性能,需要对各类

零件进行在线或离线缺陷检测。以增材制造过程为例,制造的时间与材料成本很高,如果零件制造完成后再通过离线检测发现缺陷,只能重新制造,造成严重的浪费。如果能

收稿日期:2025-03-16

^{*} 基金项目:国家市场监督管理总局重点实验室(无损检测与评价)开放基金(SYS-NDT&E-2025-002)、国家自然科学基金(51975452)项目资助

够进行在线检测发现缺陷,便可以随时中断制造过程,进行减材或补偿操作,有效提高增材制造的成功率,因此需要寻找一种合适的缺陷无损检测技术。常用的缺陷无损检测方法有荧光检验、X 射线、接触式超声波等。荧光检验、接触式超声波等方法不适用于增材制造过程的在线检测,X 射线法对防护装置要求较高。

激光超声检测技术是一种新型超声检测技术,它利用激光脉冲在被检测零部件表面激发超声波,并用干涉仪等探测超声波,从而获取工件信息如工件厚度、内部和表面缺陷以及材料参数等。目前该技术已应用到激光焊接的焊缝质量在线监控、风力发电机叶片损伤检测、飞机机身搭接腐蚀检测、各种材料涂层缺陷检测以及高温陶瓷、金属、复合材料检测等众多领域。相对于传统的超声技术,激光超声具有非接触检测、高时空分辨率(亚纳米级)、优越的宽带性能(GHz)以及一次激发可以同时产生各种模式波的特点。

武汉理工大学袁久鑫等^[1]利用激光超声探测出 10 mm 深度内直径为 1 mm 的内部缺陷,为在线检测装置研制提供了重要参考。齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所白雪等^[2]自主研制了激光超声多冶金特征同步在线检测系统,实现了对表面 0.5 mm 缺陷的检测。通过将超声激励和检测探头集成到六轴机械手上,采用振镜式激励脉冲激光束扫描及连续探测激光固定的方式,实现激光超声激励探头、激光超声检测探头、增材制造加工头三者的协同运动控制以及增材制造件表面快速遍历扫描检测,采用双波混合干涉技术实现高频超声的激光探测,设备成熟度较高。武汉理工大学的 Zeng 等^[3-4]验证了利用激光超声检测电弧熔丝打印件内部人工缺陷的可行性,但检测系统成熟度处于实验室阶段。南京航空航天大学王海涛教授团队在激光超声法检测裂纹和工件厚度方面做了大量工作,研究了小波包、变分模态分解、支持向量机等信号处理算法,提高了检测精度,为推广工业应用奠定了重要基础^[5-9]。文献^[10-11]搭建了由激光器、测振仪等组成的激光检测系统,研究了不同粗糙度表面下激光熔覆增材制件表面缺陷检测及快速成像算法,验证了增材制造过程激光超声成像在线检测的可行性。Qin 等^[12]提出了一种基于能量损失理论的激光超声无损检测的缺陷表征方法,在实验室进行了验证。国外方面,英国焊接研究所和意大利巴勒莫大学 Cerniglia 等^[13]搭建了面向激光熔覆增材制造过程的激光超声检测系统,证明了缺陷在线检测的可行性。加拿大国家研究委员会 Lévesque 等^[14]提出基于合成孔径聚焦成像的激光超声检测技术,可离线检测到未熔合等缺陷。印度马德拉斯理工学院 Geo、法国能源专家委员会文献^[15-16]搭建了一套激光超声离线检测系统,验证了缺陷检测可行性。文献检索发现,激光超声检测技术适于工业缺陷检测,优势明显,但目前激光超声检测系统成熟度有待提升,仅国外有 LUCIE 激光超声检测系统^[17],因此研制面向工业现场的激光超声缺陷在线自动检测系统迫在眉睫。

北京信息科技大学赵纪元教授团队深入研究了增材制件内部缺陷埋藏深度的激光超声定量检测、超声信号变分模态分解与裂纹定量检测等技术^[18-20]。在此基础上提出了一种五轴激光超声自动化检测方法并搭建了五轴激光超声自动化检测设备,还设计了机械臂自由扫查式激光超声检测系统并集成到电弧熔丝增材制造设备上,系统成熟度达到 6 级。可实现高精度全表面多角度在线检测、 $\varphi 0.1$ mm 缺陷的检测分辨率及埋藏深度 1~3 mm 时的高重复检测精度,通过标准试块、典型零件等进行了实验验证,实现了对缺陷空间定位、定量检测以及缺陷三维成像等功能,为产品质量提供了有力保证,在航天、航海、核电、轨道交通、压力容器与管道、有毒气体容器与管道等领域具有进一步推广和应用价值。

1 五轴机床高精度扫查式激光超声缺陷在线检测系统

针对缺陷高精度检测需求,通过对市场上常用的机器人和扫查平台调研发现,为满足 $\varphi 0.1$ mm 缺陷的高分辨率检测,常见的机器人在承重和定位精度等方面无法响应该指标,而定制满足该指标的机器人需要很大的资金投入。因此,本团队设计了一套五轴激光超声扫描检测设备,既可以满足核心器件的集成,又可实现局部高精度、小步长扫查,运动系统的重复定位精度 ≤ 0.05 mm。系统工作原理如图 1 所示。激光超声激励端通过将脉冲激光器所产生的激光进行聚焦、偏振等处理后,投射到两轴扫描振镜输入端,激光在扫描振镜的偏转作用下投射在被检测物表面并进行二维扫描,产生激光热弹超声波激励信号。超声波在被测物体内部传播,同时携带被检测物内部材料信息,并由

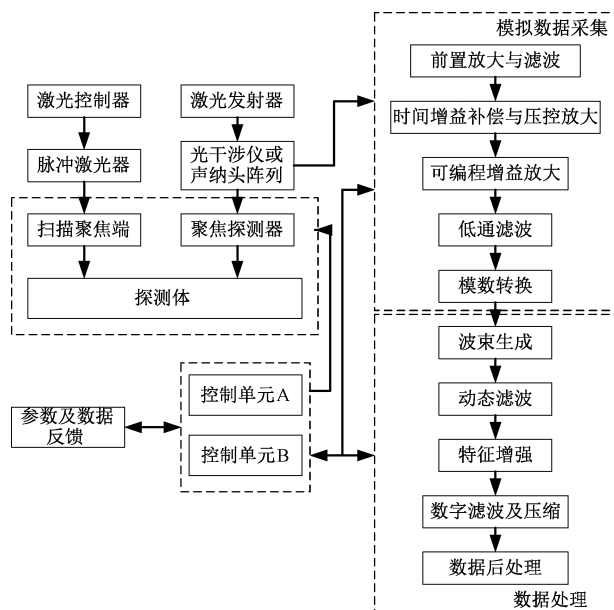
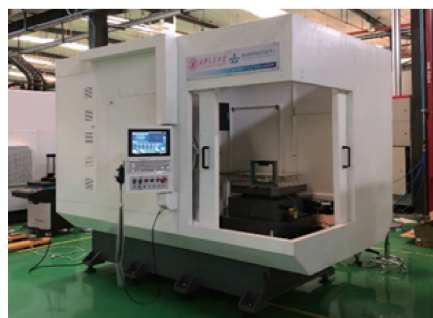


图 1 激光超声缺陷检测系统原理框图

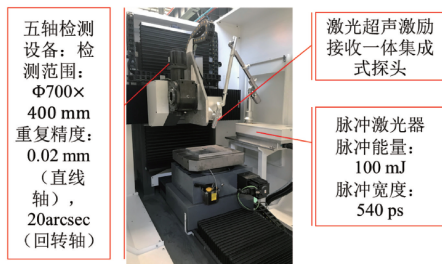
Fig. 1 Principle diagram of laser ultrasonic defect detection system

接收端通过测振仪、干涉仪或电磁超声探头等模块接收提取被测物体内部信息,从而实现超声信号检测。将探测到的电信号进行整形、模数转换以及数字图像处理等,上传到工控机进行图像重建并完成缺陷的三维定量显示检测。

图 2 为系统实物图,五轴检测设备包括工作台和摆头等,工作台具有 Y 轴方向平动自由度和 C 轴方向转动自由度,摆头具有 Z 轴方向平动自由度、X 轴方向平动自由度和 A 轴方向转动自由度,在程序控制下可按照预设轨迹进行连续运动。集成式探头安装在摆头上,主要由亚纳秒高能脉冲激光器和光干涉超声阵列传感器组成,其中亚纳秒高能脉冲激光器包括激光器主机和激光发射头,两者之间通过万向导光臂连接。被检测工件使用工装夹具固定在 C 轴工作台上。通过数控程序控制五轴检测设备连续调整位置,可保证光干涉超声阵列传感器发出的激光光线中心始终垂直照射于被检测工件表面,从而保证接收到的激光超声信号质量。脉冲激光器重复频率为 80 Hz,最大脉冲能量 100 mJ,波长 1 064 nm,光斑直径为 1.0 mm,脉冲时间为 800 ps,激励超声波频率 > 30 MHz,缺陷分辨率 $\leq \phi 0.1$ mm。



(a) 整体装置
(a) Whole device



(b) 内部核心器件
(b) Internal core components

图 2 激光超声缺陷检测装备实物图

Fig. 2 Test rig of laser ultrasonic defect detection equipment

1.1 激光信号接收模块

基于光干涉的高精度超声阵列传感器采用“激光测振仪+二维扫描振镜”的超声阵列传感器结构形式,基于光干涉的超声阵列传感器主要由激光测振仪、45°反射镜、二维扫描振镜组成,如图 3 所示。激光测振仪发出波长 632 nm 的红光,经反射镜后进入振镜,振镜根据程序设定的接收点阵列坐标将激光打在工件的不同位置,与激光超声信号在

工件表面产生的振动产生相位调制,调制后的散射光经过振镜、反射镜返回测振仪,经过解调后得到激光超声信号,从而实现激光超声信号的阵列式采集。研发的传感器能够有效采集激光超声信号,具有良好的信噪比。系统技术指标如下:波长 632 nm,带宽 24 MHz;聚焦距离:100 ~ 500 mm;光斑大小 $\leq 100 \mu\text{m}$;阵列范围:20 mm \times 20 mm;列形状:线形、环形、矩形、点阵。

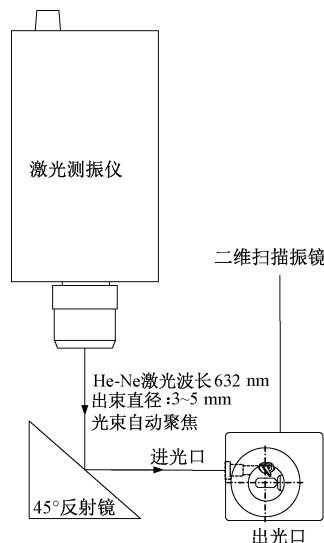


图 3 基于光干涉的超声阵列传感器系统组成与布局

Fig. 3 Composition and layout of ultrasonic array sensor system based on optical interference

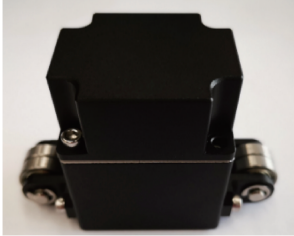
激光源激励超声采集也可采用电磁超声传感器,电磁超声是一种利用电、磁、导电材料之间相互作用产生和接收超声信号的技术,工作过程中无需耦合剂,并且可以在一定距离外在导电材料内激发超声波,实现非接触检测,相关产品成本低于空气耦合超声,而且同等成本条件下其探测精度要高于空气耦合超声。图 4 展示了电磁超声主机及其探头。

1.2 数据采集模块

LU(laser ultrasonic)信号模态多、频带宽、信息量大,为了防止信号在采集、传输过程中丢失、失真,保证后处理、分析信号的准确性,需要保证数据采集模块的抗干扰性及信号实时采集的速度,数据采集卡采用的是 Spectrum 的 M4i. 2211-x8 数据采集卡,经测试实测数据采集卡在车间工业环境采集信号信噪比分别为低频段 68 dB、中频段 67 dB、高频段 66 dB,平均信噪比为 67 dB,具有较强的抗干扰能力。经过 12 000 次外部触发采集测试,数据采集最高延迟 4.8 ms,最低延迟 0.4 ms,平均延迟 1.3 ms,具有较快的响应速度,实时性较好,可以满足实际使用中实时性的要求;数据采集点最大偏差点数为 10,最小偏差点数为 0,最大失真率低于 0.06%,数据采集卡能够在 1.25 GHz 采样频率高速稳定工作。



(a) 电磁超声主机
(a) Electromagnetic ultrasonic host



(b) 电磁超声探头
(b) Electromagnetic ultrasonic probe

图 4 电磁超声系统

Fig. 4 Electromagnetic ultrasonic system

1.3 信号预处理模块

针对激光超声信号复杂、宽频带、多模态的特点,提出宽频带激光超声信号模态分离方法,实现激光超声信号降噪与模态分离,通过阵列信号时域平均降噪法、改进的经验

模式分解算法、宽频带信号多特征分析的小波降噪方法、变分模态分解算法的有效结合,实现激光超声信号的降噪、特征增强与模态分离。对采集的激光超声信号首先采用时域平均进行去噪,平均次数越多,信号的信噪比提高越明显,高频的随机噪声被有效抑制,在 16 次时域平均以后信号信噪比 dB 值增量减小,信号改善效果降低,但是激励激光器寿命是一定的,可采用 16 或 32 次时域平均次数,在提高信噪比的同时,避免过多的时域平均次数对激励激光器的消耗,延长激励激光器使用寿命。

改进的经验模式分解 EEMD (ensemble empirical mode decomposition) 算法原理是将高斯白噪声添加到每次本征模式分解过程中,在分解过程中可以避免模式断裂和模式混淆问题。分解得到的每一个本征模态函数 IMF (intrinsic mode function) 代表信号在某一频带上的信息。EEMD 把信号 $x(t)$ 分解成多个 IMF 分量以及一个余项,小尺度的 IMF 分量对应信号的高频部分,大尺度的 IMF 分量对应于低频分量。激光超声检测的特点在于所使用的主要为信号的时域特征,正是由于 EEMD 是在时域中对频域进行处理,因此可实现对激光超声信号表面波特征提取和降噪。EEMD 分解结果如图 5 所示,IMF1 中出现的信号和表面直达波,缺陷回波时间相符,因此选定 IMF1 作为信号的最佳表征。变分模态分解算法具体工作详见文献[19]。

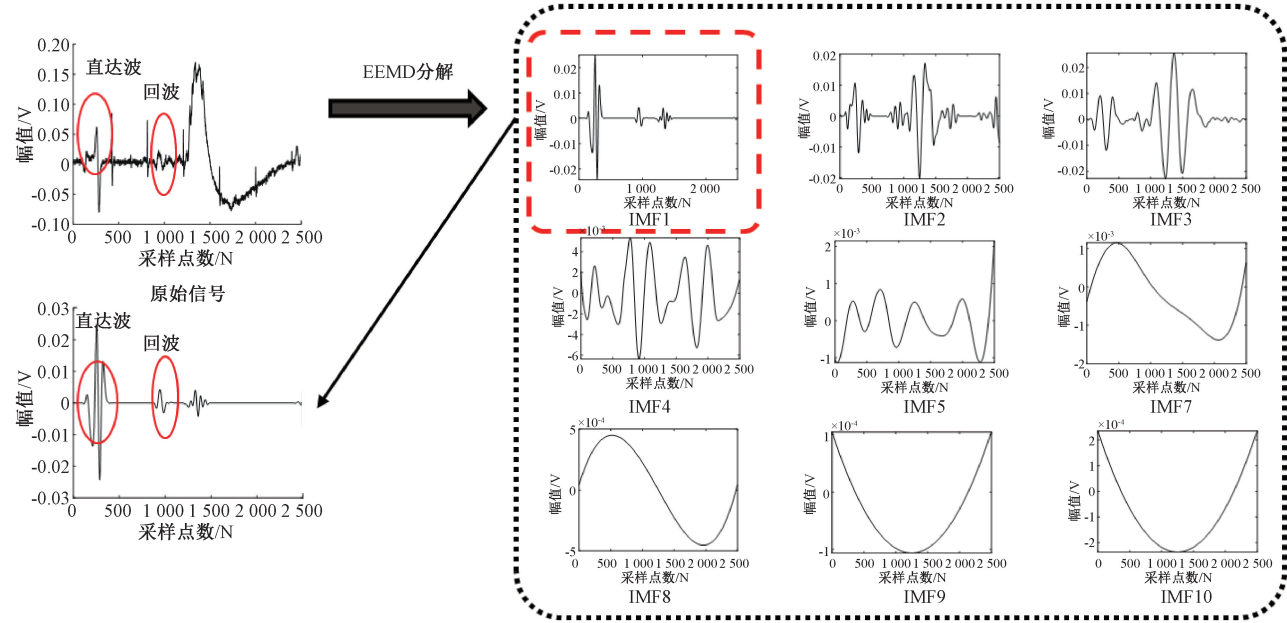


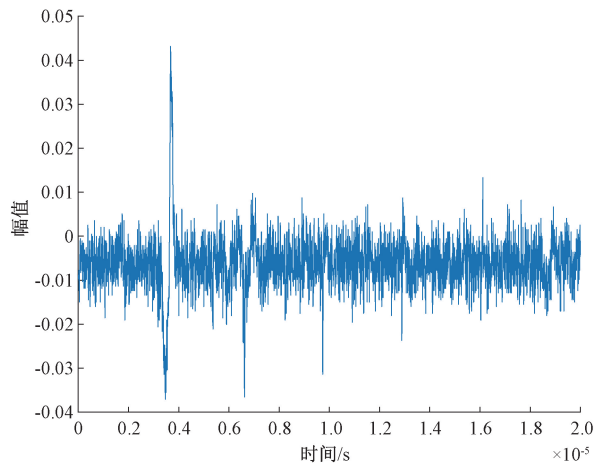
图 5 EEMD 分解结果图

Fig. 5 Results of EEMD decomposition

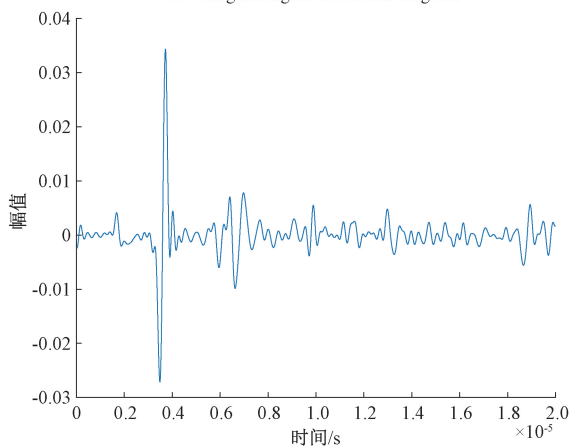
小波分析法是时间和频率的局部变换,通过伸缩和平移等运算功能可对信号进行多尺度的细化分析,能有效地从信号中提取信息。针对激光超声信号复杂、多模态、宽频带的特点,选取合理的小波基函数进行分解可实现信

号降噪与特征提取,通过对比选定 dmey 小波为最优小波基函数,对激光超声信号进行了小波分解,分解结果如图 6 所示。通过选用最优的小波基函数,得到的超声波波形与原始信号具有很大的相似度,原始信号中的杂次信号得到

了有效的过滤,表面波、表面波回波等特征在整个信号长度上得到了凸显,满足了信号降噪的要求。



(a) 原始信号波形图
(a) Original signal waveform diagram



(b) 用dmey小波基函数的降噪信号
(b) Denoised signal with dmey wavelet basis function

图 6 小波去噪结果

Fig. 6 Results of wavelet denoising

1.4 缺陷定位与三维成像

结合激光超声技术“收发分离”的特点,除了传统超声B扫和C扫成像技术之外,还可结合合成孔径聚焦成像算法^[21],实现缺陷二维高精度成像,图7展示了试块内部长度2 mm缺陷的合成孔径聚焦成像结果图。在时空动态扫描形成三维矩阵的基础上,将一系列二维图像序列根据三维成像算法投影到笛卡尔三维空间中,再利用二维图像中的像素灰度值去确定三维图像中每个网格体元的灰度值,然后将它们变换为反映真实缺陷信息的三维体数据,实现缺陷的三维定量化显示。缺陷三维显示模块针对标准试块检测结果,可准确显示缺陷位置、形状、尺寸,由其三视图可直观观察到缺陷三维信息。以叶片为例,对待测叶片进行三坐标扫描,重建其三维模型,针对检测到内部气孔缺陷,使用缺陷三维显示模块进行三维成像,显示结果如图8所示。

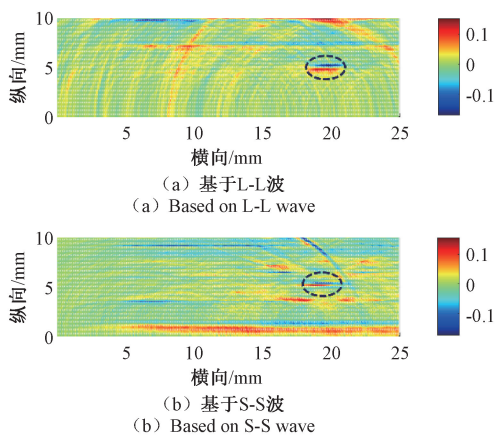


图 7 内部缺陷长度 2 mm 的合成孔径聚焦成像

Fig. 7 Synthetic aperture focused imaging with internal defect length of 2 mm

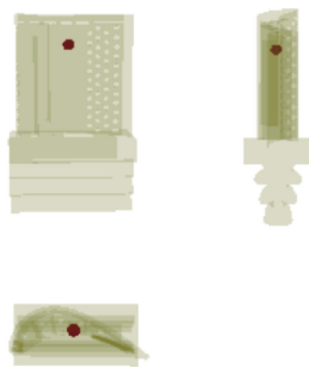


图 8 叶片检测缺陷三维显示结果

Fig. 8 3D display results of blade detection defects

2 机械臂自由扫查式激光超声缺陷在线检测系统

针对增材制造过程中新成形层缺陷在线检测难的问题,提出一套激光超声在线检测方案,搭建以机器臂、脉冲激光器、干涉仪为核心的金属增材制件缺陷的激光超声在线检测装备,集成在电弧熔丝增材制造设备上,采用独立机器人进行扫查,灵活性更高,集成红外测温仪,对超声数据进行温度修正。该装备针对增材制造“逐层增加”的特点,实现制造过程中的逐层检测,实现 $\varphi 0.4$ mm 近表面缺陷的检测。图9为系统硬件控制框图,采用PLC进行检测同步控制与数据采集。图10为系统实物图,图11为系统各部分硬件参数。

如图12所示,LU检测数据处理软件采用功能模块化设计,包括数据预处理模块(去趋势项、低通滤波、归一化,提高信号的信噪比和一致性)、B扫描成像模块(当激励点和接收点跨过近表面缺陷时,直达波被缺陷阻挡,B扫图像中具有清晰指示)、C扫描成像模块(依据缺陷波出现的位置,选取合适的时间窗进行成像,对原始成像结果进行插

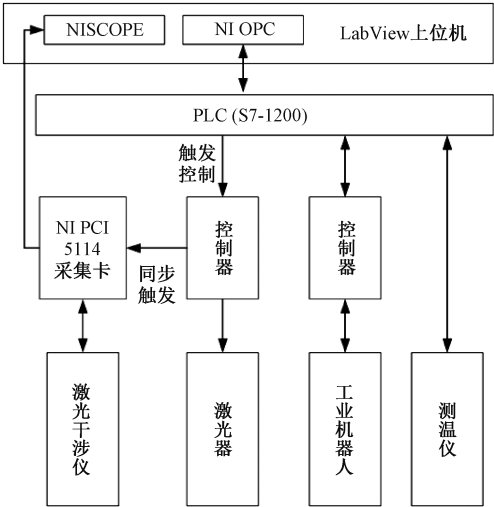


图 9 激光超声在线检测系统硬件控制框图

Fig. 9 Hardware control block diagram of laser ultrasonic on-line detection system

值,以提高显示效果)。

3 实验验证

3.1 激光超声标准试块和模拟试块制备

针对关键零部件工艺成型过程中存在的杂质、孔洞、裂缝、铸件残缺等缺陷检测,采用包括平底孔、横通孔、表面裂纹、内部裂纹 4 种类型预置缺陷,对典型件表面与内部缺陷进行模拟。标准试块参考 ASTM E428-2008、ISO 13588、JB/T 8428、ASTM E127-2015 等标准设计,设计有平底孔(内部缺陷)试块如图 13 所示、平底孔(表面缺陷)试块如图 14 所示、内部裂纹(内部缺陷)试块如图 15 所示、表面裂纹(表面缺陷)试块如图 16 所示、横孔(内部缺陷)试块如图 17 所示。根据设计要求,制备的部分标准试块如图 18 所示,4 种缺陷试块占比相同。对制备完成的标准试块,项目组进行了多种方法的检测,包括表面粗糙度检测、超景深显微镜检测、塞规检测等。试块制备质量一致性高,缺陷边缘清晰,缺陷深度信息、孔径大小、各缺陷的极

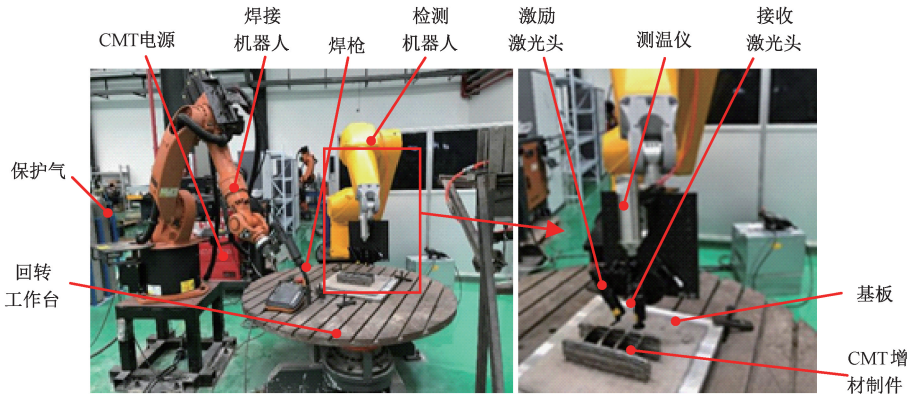


图 10 集成激光超声检测的电弧熔丝增材制造系统

Fig. 10 A wire arc additive manufacturing system with integrated laser ultrasonic detection

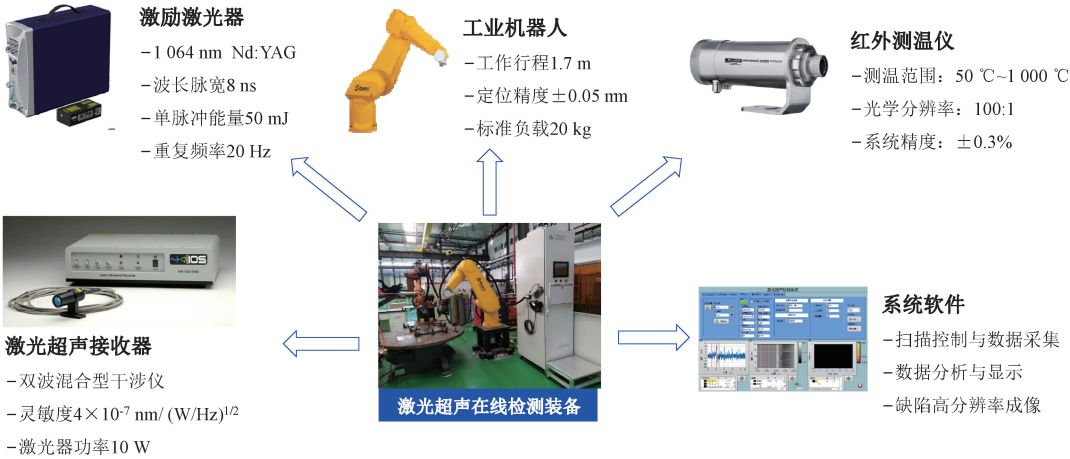
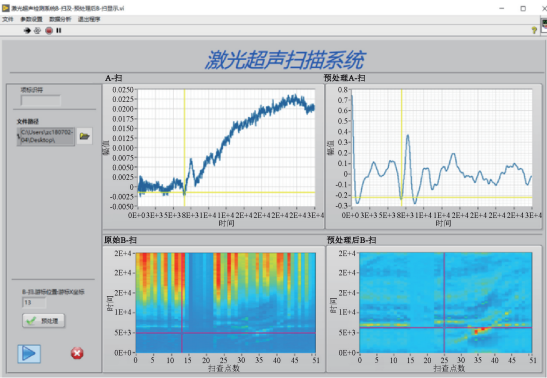
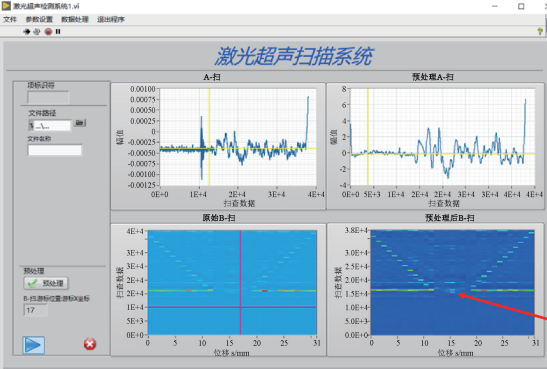


图 11 硬件参数

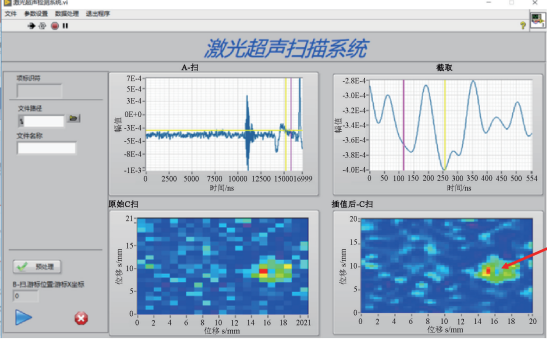
Fig. 11 Hardware parameters



(a) 数据预处理
(a) Date pre-processing



(b) B扫
(b) B scan



(c) C扫
(c) C scan

图 12 LU 检测数据处理软件

Fig. 12 Data processing software of LU detection

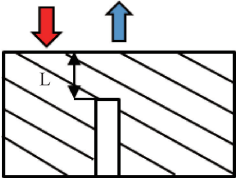


图 13 平底孔剖视图(红色为激励,蓝色为接收)

Fig. 13 Horizontal hole section view (red for excitation, blue for reception)

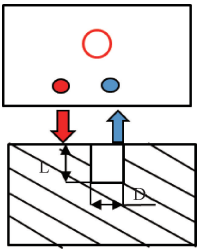


图 14 平底孔(红色为激励,蓝色为接收)

Fig. 14 Flat bottom hole (red for excitation, blue for receiving)

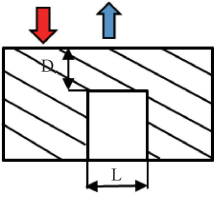


图 15 内部裂纹(红色为激励,蓝色为接收)

Fig. 15 Internal cracks (red for excitation, blue for reception)

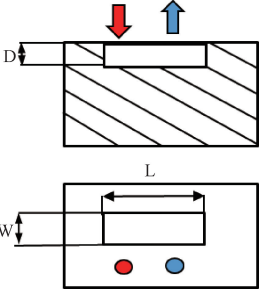


图 16 表面裂纹(红色为激励,蓝色为接收)

Fig. 16 Surface cracks (red for excitation, blue for reception)

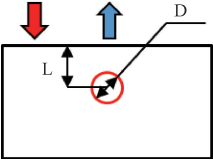


图 17 横孔(红色为激励,蓝色为接收)

Fig. 17 Cross hole (red for excitation, blue for receiving)

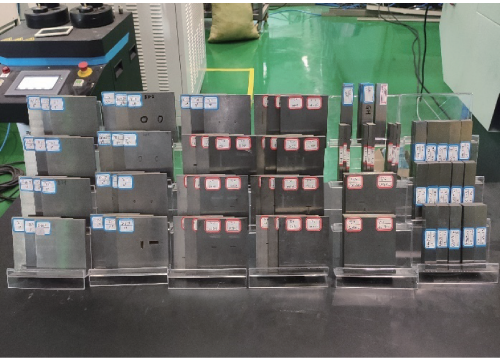


图 18 标准试块

Fig. 18 Standard test block

限尺寸偏差为 $\pm 0.05\text{ mm}$,可支持本项目设备验证和算法优化工作。

3.2 实际试块缺陷检测结果

本试验采用涡轮盘、叶片进行缺陷检测精度测试试验与系统可行性试验,测量结果如表 1~3 所示。激光超声深度缺陷检测系统在叶片、涡轮盘检测实验中表现良好,对不同待测件上 7 个缺陷检测结果表明:激光超声深度缺

陷检测系统可有效检测航空发动机叶片及涡轮盘中大小为 0.1 mm 的缺陷,其中槽缺陷长、宽、深及孔缺陷的孔径、孔深的检测误差均在 10% 以内,缺陷位置的检测误差均小于 0.3 mm。激光超声深度缺陷检测系统检测分辨率达到 0.1 mm,可实现叶片、涡轮盘、增材制件缺陷高精度检测。

表 1 涡轮盘检测信息
Table 1 Turbine disk detection information

缺陷种类	缺陷属性	实际值/mm	检测值/mm	尺寸相对误差/位置绝对误差
槽	长	10	10.240	2.4%
	宽	0.5	0.479	4.2%
	深	2	2.110	5.5%
	X 坐标值	0.000 0	0.114	0.114 mm
	Y 坐标值	225.000 0	224.723	0.277 mm
孔 1	孔径	0.1	0.091	9%
	深度	1.5	1.564	4.3%
	X 坐标值	-194.856	-194.657	0.199 mm
	Y 坐标值	-112.5	-112.321	0.179 mm
孔 2	孔径	0.5	0.531	6.2%
	深度	1.5	1.573	4.9%
	X 坐标值	194.855 7	195.028	0.172 mm
	Y 坐标值	-112.5	-112.286	0.214 mm

表 2 叶片(TC17)检测信息
Table 2 Blade (TC17) detection information

缺陷种类	缺陷属性	实际值/mm	检测值/mm	尺寸相对误差/位置绝对误差
孔 1	孔径	0.1	0.108	8%
	深度	1	1.029	2.9%
	X 坐标值	-27.925	-27.787	0.138 mm
	Y 坐标值	-284.128	-283.934	0.194 mm
孔 2	孔径	0.1	0.092	8%
	深度	2	1.874	6.3%
	X 坐标值	-27.925	-27.792	0.133 mm
	Y 坐标值	-466.732	-466.521	0.211 mm
孔 3	孔径	0.2	0.187	6.5%
	深度	2	2.178	8.9%
	X 坐标值	-27.925	-28.103	0.178 mm
	Y 坐标值	-354.428	-354.253	0.175 mm

表 3 叶片(TC4)检测信息
Table 3 Blade (TC4) detection information

缺陷种类	缺陷属性	实际值/mm	检测值/mm	尺寸相对误差/位置绝对误差
孔	孔径	0.1	0.093	7%
	深度	1.5	1.579	5.3%
	X 坐标值	-20.875	-20.687	0.188 mm
	Y 坐标值	-134.528	-134.658	0.130 mm

激光超声检测技术无需耦合介质,与传统超声探伤相比可以消除因耦合剂的使用产生的材料污染及附加影响。此外激励与接收源可以放置在距被测件较远距离处,因而可以应用在高温、高压、易腐蚀等恶劣环境中,且维护量少。激光超声可以实现脉宽为纳秒级的超声脉冲,检测频带宽,检测时间分辨率和空间分辨率较压电超声有大幅度的提高。可实现高精度、快速、大范围扫查以及在线检测,对被测试件的形状的要求较低,可用于检测表面粗糙、曲率较大、几何形状复杂的物体和受限制的空间区域。

为了兼顾扫查效率和扫查范围,设置的扫查步长为 0.1 mm,检测分辨率也为 0.1 mm。后续可根据检测精度要求在保持检测效率的前提下适当缩短扫查步长,提高横向分辨率,探究该情形下运用所提出的内部缺陷成像方法检出细微尺寸变化的能力。此外试件厚度远大于激发出的超声波波长,当制件厚度与波长相近时,超声波的传播形式将体现为板波,对试件中板波的具体分析及其运用于表面和内部缺陷定量检测的可行性值得后续深入探讨。

4 结 论

针对工业制造过程典型零部件缺陷检测需求,通过设计高精度超声阵列传感器,基于 EEMD、小波去噪、传统 A/B/C 扫以及合成孔径聚焦成像等激光超声信号特征提取与缺陷三维定量显示等关键技术,集成开发五轴机床高精度扫查式、机械臂自由扫查式两套激光超声缺陷在线检测系统样机,缺陷分辨率可达 0.1 mm、检测深度可达 3 mm、扫描角度 360°、技术成熟度达 6 级,可实现在线检测,后续可进一步推广应用在各类工业制造与检测过程,提升产品质量。

参考文献

- [1] 袁久鑫,秦训鹏,张进朋,等. 基于激光超声的电弧增材制件内部缺陷深度检测[J]. 中国机械工程, 2021, 32(1): 65-73.
- YUAN J X, QIN X P, ZHANG J P, et al. Depth detection of internal defects for arc additive products based on laser ultrasound[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2021, 32(1): 65-73.
- [2] 白雪,马健,许万卫,等. 基于激光超声的金属增材制造在线检测技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(20): 70-82.
- BAI X, MA J, XU W W, et al. Research on online testing technology for metal additive manufacturing based on laser ultrasonic [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(20): 70-82.
- [3] ZENG Y, WANG X K, QIN X P, et al. Laser ultrasonic inspection of a wire+ arc additive manufactured(WAAM) sample with artificial defects[J]. Ultrasonics, 2021, 110: 106273.

- [4] ZENG Y, WANG X K, QIN X P, et al. Laser ultrasonic inspection of defects in wire arc additive manufactured samples with different surface profiles[J]. Measurement, 2022, 188: 110597.
- [5] YI Q J, WANG H T, GUO R P, et al. Laser ultrasonic quantitative recognition based on wavelet packet fusion algorithm and SVM[J]. Optik, 2017, 149: 206-219.
- [6] LI S Y, WANG H T, GUO R P, et al. Non destructive testing thickness measurement by laser ultrasound under high temperature[J]. Optik, 2018, 172: 1140-1154.
- [7] JIANG Y, WANG H T, CHEN S, et al. Quantitative imaging detection of additive manufactured parts using laser ultrasonic testing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 186071-186079.
- [8] JIANG Y, CHEN S, WANG K Z, et al. Quantitative detection of rail head internal hole defects based on laser ultrasonic bulk wave and optimized variational mode decomposition algorithm [J]. Measurement, 2023, 218: 113185.
- [9] CHEN S, WANG H T, JIANG Y, et al. Wall thickness measurement and defect detection in ductile iron pipe structures using laser ultrasonic and improved variational mode decomposition[J]. NDT & E International, 2023, 134: 102767.
- [10] ZHANG J, WU J F, ZHAO X, et al. Laser ultrasonic imaging for defect detection on metal additive manufacturing components with rough surfaces [J]. Applied Optics, 2020, 59 (33): 10380-10388.
- [11] CHEN Y, JIANG L Z, PENG Y C, et al. Ultra-fast laser ultrasonic imaging method for online inspection of metal additive manufacturing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 160: 107244.
- [12] QIN F, LI B, CHEN L, et al. Interaction analysis of different defects with laser ultrasonic sound waves and defect characterization [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108630.
- [13] CERNIGLIA D, SCAFIDI M, PANTANO A, et al. Inspection of additive-manufactured layered components[J]. Ultrasonics, 2015, 62: 292-298.
- [14] LÉVESQUE D, BESCOND C, LORD M, et al. Inspection of additive manufactured parts using laser ultrasonics [C]. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2016, 1706(1):130003.
- [15] DAVIS G, NAGARAJAH R, PALANISAMY S, et al. Laser ultrasonic inspection of additive

- manufactured components [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102: 2571-2579.
- [16] MILLON C, VANHOYE A, OBATON A F, et al. Development of laser ultrasonics inspection for online monitoring of additive manufacturing[J]. Welding in the World, 2018, 62: 653-661.
- [17] BENTOUHAMI F, CAMPAGNE B, CUEVAS E, et al. LUCIE-A flexible and powerful Laser Ultrasonic system for inspection of large CFRP components[C]. 2nd International Symposium on Laser Ultrasonics, Talence(France), 2010.
- [18] 田雪雪, 赵纪元, 卢秉恒, 等. 增材制件内部缺陷埋藏深度的激光超声定量检测[J]. 中国机械工程, 2022, 33(8): 952-959.
- TIAN X X, ZHAO J Y, LU B H, et al. Laser ultrasonic quantitative detection of buried depth for internal defects in additive manufacturing parts[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2022, 33 (8): 952-959.
- [19] 颜江涛, 赵纪元, 訾艳阳, 等. 激光超声信号变分模态分解与裂纹定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 223-230.
- YAN J T, ZHAO J Y, ZI Y Y, et al. Variation mode decomposition of laser ultrasonic signal and crack quantitative detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 223-230.
- [20] 颜江涛, 赵纪元, 王琛玮. 裂纹深度的激光超声透射瑞利波定量检测[J]. 中国测试, 2025, 51(2): 140-147, 154.
- YAN J T, ZHAO J Y, WANG CH W. Quantitative detection of crack depth by laser ultrasonic transmitted Rayleigh wave [J]. China Measurement & Test, 2025, 51(2): 140-147, 154.
- [21] 李俊燕, 沈中华, 倪晓武, 等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 269-275.
- LI J Y, SHEN ZH H, NI X W, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 269-275.

作者简介

郭森, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: guomiao@bistu.edu.cn

赵纪元(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高端制造装备及自动化、质量监测与控制等。

E-mail: jiyuan.zhao@bistu.edu.cn