

基于双探头协同检测系统的超声波无损探伤精度优化设计

谢文财

大连万衡检测有限公司, 辽宁 大连 116000

[摘要]超声波无损探伤技术在工业检测领域占据重点地位,其检测精度直接决定了结构安全评估的可靠性。传统单探头检测模式在复杂几何形貌及微小缺陷识别上存在固有局限,难以满足高精度检测需求。双探头协同检测系统通过发射与接收探头的空间安排优化及信号融合方法,明显提升了声场包含范围与信噪比。本文专注于双探头协同机制下的声场干涉规律、波束合成算法及多源数据融合方法,深入剖析影响检测精度的关键物理因素。通过打造理论模型与优化设计流程,提出一套能够自适应调整探头间距与角度的协同检测架构,主要是为了从物理层到算法层实现探测精度的系统性跃升,为高端装备制造提供坚实的无损检测技术支持。

[关键词]双探头协同;超声波无损探伤;精度优化

DOI: 10.64635/ja.2026.1247

中图分类号: TB553

文献标识码: A

Optimization Design of Ultrasonic Nondestructive Testing Accuracy Based on a Dual-Probe Cooperative Detection System

Xie Wencai

Dalian Wanheng Testing Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116000, China

Abstract: Ultrasonic non-destructive testing (NDT) plays a pivotal role in industrial inspection, and its detection accuracy directly determines the reliability of structural safety assessment. The conventional single-probe detection method has inherent limitations in identifying micro-defects and inspecting components with complex geometric profiles, which makes it unable to meet high-precision detection requirements. By optimizing the spatial layout of transmitting and receiving probes and adopting signal fusion methods, the dual-probe cooperative detection system effectively expands the sound field coverage and improves the signal-to-noise ratio. This paper focuses on the sound field interference rules, beamforming algorithms and multi-source data fusion methods under the dual-probe cooperation mechanism, and thoroughly analyzes the key physical factors affecting detection accuracy. By establishing theoretical models and optimal design procedures, a cooperative detection framework capable of adaptively adjusting probe spacing and angles is proposed. It aims to achieve a systematic improvement in detection accuracy from the physical layer to the algorithm layer, and provide a solid technical support for non-destructive testing in the manufacturing of high-end equipment.

Keywords: dual-probe cooperation; ultrasonic nondestructive testing; accuracy optimization

引言

现代工业制造体系里,材料内部缺陷的早期识别和准确定位,对于保证设备整个生命周期的安全运行来说十分重要。随着航空航天、核能设施、精密机械等高端装备对结构完整性要求越来越高,传统的单一检测方法已经不能满足复杂的工况下使用。超声波无损探伤是非破坏性检测技术中使用最广的一种,具有穿透力强、灵敏度高等特点,被广泛应用于工业界。

1 双探头协同检测系统的声场特性与精度制约机理

1.1 双探头协同模式的声场分布演化规律

双探头协同检测系统中的声场并不是两个独立的声源相加而成,而是由许多个不同频率、不同的强度的多普勒效应波相互叠加、干涉而成的。当发射探头和接收探头以一定的角度、距离布置的时候,声波在介质中传播并相互作用,就形成了有指向性、有聚焦性的合成声场。合成

声场的形态决定系统探测能力以及分辨率。

1.2 影响检测精度的多维物理因素耦合分析

检测精度与声场的理想分布有关，也和许多物理因素存在耦合干扰。介质声学参数不均匀会造成精度下降。实际工程中被检材料晶粒粗大、各向异性或者内部应力分布不均等都会造成声波速度局部变化，使声束发生折射或者散射，偏离预设的传播路径。其次，探头和被检表面的耦合情况直接影响到信号的好坏。耦合层厚度变化、表面粗糙度和接触压力不均都会使声能衰减、反射，造成回波幅值失真。

将各类干扰因素进行分别整理，将成因与影响确定，详情下表。

表 1 各类干扰因素成因与影响

影响分类	具体因素	产生原因	对检测精度的影响
介质声学因素	晶粒粗大、各向异性、内应力不均	被检材料本身材质与内部状态	声束折射、散射，传播路径偏移
耦合接触因素	耦合层厚度、表面粗糙度、接触压力	探头与工件接触面状态不稳定	声能衰减、回波幅值失真
电子系统因素	本底噪声、量化误差、电磁干扰	硬件电路、外部电磁环境	微弱缺陷回波被噪声掩盖
协同同步因素	时间误差、相位晃动	双通道信号不同步	信号融合相位异常，成像对比度下降

2 基于声场干涉调控的探头布局优化设计

2.1 探头相对位置与角度的几何约束模型

为了达到最高的检测精度，必须要建立严格的几何约束模型来控制探头的布局设计，该模型主要在于声场覆盖范围和能量集中度之间的矛盾，在用解析几何方法结合声学波动方程的方法进行求解时，可以得到探头间距以及入射角同声场焦点的位置关系的精确定量公式，在一定范围内增大探头间距会使焦距变短、纵向探测深度增大，但是也会造成主瓣变窄而产生大量远场干扰，在这种情况下增大间距会使检测深度增大，横向分辨能力下降，主瓣变宽，反之减小间距可以增强探测深度，但会减小横向分辨能力并扩大主瓣宽度，另外探头角度的选取也非常重要，不同入射角度所对应的波型转换效率和声束折射路径是完全不同的，在检测不同取向的缺陷时需要根据实际工况来调整探头角度以获得最好的反射回波信号，为此必须建立一个包含探头间距、入射角度、工作频率和材料声速等诸多因素的复杂的三维空间，采用数值模拟的方式找到最佳的方案，在这个空间里目标函数应当把声场

主瓣宽度最小化和旁瓣电平最优化结合起来，这样可以在任何深度都能够得到清晰的缺陷图像，几何约束模型给初始布局赋予了结实的理论支撑，也为后期的动态调节创建起数学根基，其推导过程要全面考量介质界面的菲涅尔反射和透射系数。

2.2 自适应声场聚焦策略与动态调整机制

传统的固定式探头布置方式很难适应复杂的检测对象，因此需要采用自适应聚焦技术，即根据被检部位的几何形状以及预期缺陷类型来实时调节探头的位置和角度，使声场焦点一直保持在被检测的区域内，该技术的实现需要高精度的机械驱动系统和智能控制算法的共同作用，通过传感器实时获取探头的位置信息，控制系统可以迅速计算出当前的声场分布情况，并据此发出调整指令，驱动执行机构做微米级的微调，实现动态调整，另外还要对声场干涉模式进行主动干预，例如在一些特殊情况下可以通过改变探头的激发时序或者相位差，人为地制造出所需要的干涉图样，以此来加强某一方向上的声能或者抑制某一个区域内的噪声，比如检测曲面工件的时候，可以利用相位延迟补偿声程差，使声束在曲面上垂直入射，从而减小由于入射角的变化造成的声能损失，这样一种主动式声场调控手段大大扩展了双探头协同系统的使用范围和检测灵活性，可以满足从平面薄板到复杂曲面结构的各种检测任务，也解决了传统静态布局不能兼顾各个深度和角度缺陷检测的缺点。

3 多源信号融合算法与缺陷特征重构技术

3.1 双通道信号的时间同步与相位校正

时间同步以及相位校正，在多源信号融合的过程中属于第一步重要的工作。由于双探头系统有两个独立的信号采集通道，硬件电路延时不同、采样时钟漂移都会造成两路信号在时间轴上出现错位。错位会造成信号的相干性被破坏，从而使得后面波束合成、成像处理等环节无法进行。因此必须设计高精度的时间同步系统，用共模参考信号或者外部触发脉冲来校准各个通道的采样时刻，保证数据采集的同步性。

相位校正属于提高融合质量的重要步骤。超声波传播过程中，介质吸收、散射会造成信号相位出现非线性改变。长距离传输或者高频检测的时候，相位畸变会变得很明显。利用建立的介质传输模型，对接收到的信号进行相位补偿，得到原始波形。还要考虑到探头本身的频响特性不同，采用数字滤波或者均衡的方式对幅度响应进行修正，使两路信号在频域上保持一致，为后面的特征提取做好铺垫。

3.2 基于加权融合的特征增强与缺陷成像

经过信号预处理之后，主要任务就是采用加权融合的方法得到缺陷特征，并重建出高分辨率图像。加权融合策略根据各个通道信号的信噪比、相关性、能量强度等动态给信号加权系数，将两个最好的信息做线性或者非线性组合。对强相关信号用相干叠加来提高缺陷回波的幅度，对弱相关或者噪声占优的信号用非相干叠加或者最大概率估计的方式，从而抑制随机噪声。

双通道信号从预处理到成像重构的全流程技术方案汇总如下表所示。

表 2 双通道信号从预处理到成像重构的全流程技术方案

处理阶段	核心工作	采用技术/方法	实现目标
第一步	时间同步校准	共模参考信号、外部触发脉冲	消除通道时钟漂移、电路延时，保证采样同步
第二步	相位畸变校正	介质传输模型、相位补偿算法	修复声波传播造成的非线性相位偏移
第三步	频响幅度修正	数字滤波、均衡算法	统一两路信号频域特性
第四步	信号加权融合	动态加权系数、相干/非相干叠加	增强缺陷回波，抑制随机噪声
第五步	缺陷成像重构	反投影算法、迭代重建+正则化	生成二维/三维缺陷图像，消除伪影

4 系统精度验证体系与误差抑制策略

4.1 多维度精度评价指标体系的构建

为了科学评价双探头协同检测系统的性能，必须建立一个包含空间分辨率、信噪比、检出率和重复性等各个方面的评价指标体系。空间分辨率表示系统能分辨相邻缺陷的程度，一般用半高全宽(FWHM)来衡量，信噪比表示信号的质量好坏，直接决定微小缺陷的检出下限，检出率反映系统对于已知缺陷的识别程度，是检验系统可靠性的重要指标，重复性体现系统在不同的检测次数下保持稳定性的表现，体现设备的稳定性。

这些指标并非孤立存在，而是相互关联、相互制约的。提高空间分辨率会降低信噪比，追求高检出率就要增大检测阈值，进而影响误报率的控制。因此在系统设计阶段需要根据具体的使用场景需求来给各个指标赋予不同的权重，从而达到多目标优化的目的。通过实验测试和理论计算的对比来检验指标体系是否合理，根据实际检测结果对评价标准进行修正，保证系统的性能达到要求。

4.2 环境干扰抑制与系统鲁棒性增强措施

环境干扰属于影响检测精度的外部环境因素，在实际工程中经常出现。温度改变、振动噪声以及电磁辐射都会对超声信号的传送和接收造成影响。为了提高系统鲁棒性，

需要做一系列的抑制措施。从硬件上讲，用恒温控制模块来保证探头的工作温度稳定，用隔振平台消除机械振动的影响，用电磁屏蔽罩来阻断外界的电磁干扰。软件层面开发自适应滤波算法，按照环境噪声特性动态改变滤波参数，较好地滤除非相干频段的噪声。

4.3 多源误差补偿机制与实时校准模型

对检测时由于温度漂移、材料声速变化、探头老化的系统性误差，要创建动态的多源误差补偿体系和即时校准模型。核心就是创建起包含环境参数监测和历史数据修正的闭环反馈系统，用高精度温度传感器和压力传感器实时采集检测现场的物理场数据，根据预存的声速-温度特性曲线对当前介质声速进行在线修正，消除由于环境温度变化引起的声程计算误差。同时在每次检测任务开始前或者检测到异常信号的时候，系统会自动驱动探头扫描内置的标准反射体，将理论回波位置 and 实际回波位置之间的差值作为当前综合定位误差系数，然后根据该误差系数对以后所有的检测数据的坐标进行实时补偿。另外由于探头晶片长期工作会受到疲劳的影响，造成中心频率偏移和灵敏度降低，所以系统还要记录探头的累计使用次数以及历史性能衰减曲线，用机器学习算法预测当前的频响特性，在信号处理过程中用自适应均衡滤波器补偿信号幅值和相位的不一致。多层次、多维误差补偿方式能较好地克服由一个因素造成的测量误差，并且通过综合考虑多种信息来改善系统长时间工作的稳定性及数据可靠性，给高精度无损检测提供了有力的误差控制手段。

5 结论

本文主要对基于双探头协同检测系统的超声波无损探伤精度优化设计进行研究，从声场特性分析、探头布置改进、信号融合算法、误差抑制等方面建立起完整的理论体系和设计体系。探究双探头协同工作时声场的干涉情况，提出了以几何约束模型为依据的探头布置优化办法，达成声场能量的精确集中和盲区的消除，设计出了自适应聚焦的策略和动态调节的机制，加强了系统对于各种检测对象的适应能力，创建了基于加权融合的高分辨率成像算法，明显改善了缺陷特征的提取精确度及抗干扰水平，最后创建起多方面精度评判体系和环境干扰抑制办法，保证了系统在繁杂工况下的鲁棒性和可靠性。研究成果一方面加深了对双探头协同检测机理的理论认识，另一方面也为实际工程中高精度无损检测系统的发展提供了一条可行的技术途径和理论支持，对促进我国高端装备制造领域无损检测技术的提高有着十分重要的现实意义。

[参考文献]

- [1]孙贺斌,周治伊,吕岩婷,吴金花,周延科.基于低频双探头超声波的盆式绝缘子缺陷检测方法研究[J].绝缘材料,2023,56(01):110-114.
- [2]彭星翔,董尔谦,童峰.基于超声波双探头测距差值的目标方向估计[A]2016年全国声学学术会议论文集[C].中国声学学会,中国声学学会,2016:4.
- [3]张大山.基于双探头检测系统的超声波无损探伤设计[D].内蒙古大学,2016.
- [4]熊亮,陈红冬,邓宏平,陈琳依.厚壁大径管对接焊缝根部缺陷的一纵一横双探头超声波衍射法定性定量检测[J].无损检测,2011,33(06):30-34.
- [5]陈美群.双探头超声波探伤检测仪探头支架.天津市,天津中西宏业数控机械技术有限公司,2009-11-16.