

◇ 研究报告 ◇

轴类超声检测的波束扩散成像*

张琪¹ 胡斌^{2†} 陈乐¹ 原可义²

(1 中国计量大学机电工程学院 杭州 310018)

(2 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要: 大型轴类工件安装完成后通常只能从其端面进行检测, 危害性的裂纹类缺陷不易检出。针对上述问题, 该文提出了轴类对象基于波束扩散的端面网格化超声检测层析成像方法, 搭建了轴类超声检测试验平台, 在端面对其内部的平底孔缺陷进行检测, 基于波束扩散设计叠加算法进行数据处理, 然后根据结果重构出代表每个深度内部信息的伪彩色横截面图像, 以方便快速识别内部缺陷位置和范围。与常规方法对比得出, 基于波束扩散的叠加算法处理数据成像质量更佳, 检测数据信号增益能够达到 12 dB 以上。

关键词: 轴类超声检测; 层析成像; 波束扩散; 叠加算法

中图法分类号: TG115.28+5

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)04-0570-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.04.011

Image method of shaft ultrasonic detection based on beam diffusion

ZHANG Qi¹ HU Bin² CHEN Le¹ YUAN Keyi²

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(2 China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: After the installation of large shaft workpieces, it is usually only possible to detect from the end faces, and the dangerous crack defects are not easy to detect. In view of the above problems, this paper proposes a beam-based end-grid ultrasonic detection tomography method based on beam diffusion. A shaft ultrasonic testing platform was built, and the flat bottom hole defects were detected at the end face. The data were processed based on the beam diffusion design superposition algorithm, and then the pseudo color cross section representing the internal information of each depth was reconstructed according to the result. In order to identification of internal defect locations and ranges, compared with the conventional method, the beam diffusion based superposition algorithm processes the data imaging quality better, and improves the defect detection sensitivity to more than 12 dB.

Keywords: Shaft ultrasonic testing; CT; Beam diffusion; Accumulation algorithm

2019-09-21 收稿; 2019-11-28 定稿

*国家重点研发计划重点专项 (2017YFF021070)

作者简介: 张琪 (1995-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向: 超声无损检测。

†通信作者 E-mail: hubin@csei.org.cn

0 引言

轴类部件是各种机械设备中最常用的承载或动力传递部件,该类工件的在役损伤会导致机器剧烈振动,增加其他部件损伤的概率,甚至会引起设备的整体失效。因此,对轴类工件进行缺陷检测与工况诊断是非常必要的。超声检测技术是工业无损检测领域的重要方法,超声检测穿透力强、灵敏度高,且成本低、速度快,可检测长达数米的大型钢锻件,因此超声波无损检测方法适合对轴类进行检测^[1-2]。

近年来,国内外有关大型轴类检测和超声信号处理成像的研究成果显著。在大型轴类检测方面,张开良等^[3]设计了旋转式探头推进系统对空心轴类进行检测,该系统可对轴类内部及外表面的纵向缺陷、横向缺陷等进行检测,检测结果表明该方法灵活度高。牛卫飞等^[4]采用线性探头的相控阵检测游乐设施轴类模拟试件,对比不同频率探头在轴端面检测缺陷的效果,实验结果表明该方法可以检测出长度为1 m的轴表面的细小人工缺陷。在超声信号处理成像方面,宋雨珂等^[5]通过超声 ALOK 方法检测轴类零件内部小孔缺陷,其改进的算法提高了对缺陷位置和尺寸的检测精度。Holmes等^[6]提出了全矩阵聚焦成像算法,采用多通道技术表征材料内部缺陷的几何特征,其成像质量明显优于传统相控阵偏转聚焦成像算法。Schickert^[7]采用超声检测混凝土,通过二维切片构建出混凝土构件中的缺陷图像。鉴于大型轴类端面检测的特殊性,本文采用计算机层析成像(Computer tomography, CT)以切片方式构建轴类构件中的缺陷图像。

本文以直轴为实验对象,制作了直轴超声检测试块,搭建轴类超声检测试验平台,在端面对其内部的平底孔缺陷进行检测,研究了超声波在轴类内部的传播过程,获得了不同频率的深度-幅值信号图;提出了基于波束扩散的叠加算法处理超声数据,并对处理数据进行层析成像,提高了数据的信噪比,为研究大型轴类缺陷超声检测和缺陷成像提供了一种可行的方法。

1 原理与方法

1.1 大型轴类部件的端面 C 扫描检测方法

大型轴类部件安装完成后难以拆卸,通常从其

端面进行检测,采用网格化数据采集,按照 C 扫描的方式进行成像,由于检测深度较大,通常对检测结果进行分层成像。C 扫描网格化示意图如图 1 所示。

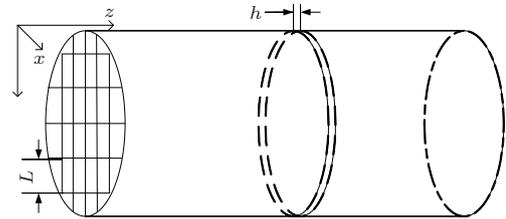


图 1 C 扫描网格化示意图

Fig. 1 The gridding diagram of C-scan

超声检测信号的常规处理方法是对所获得的时域回波信号 $w(n)$ 进行空间上的声程转化处理,从而转化为深度信号,即二分之一声程上的回波信号。声波示意图如图 2 所示,图中 z 为工件长度, p 代表超声信号在检测物体内部声波发射返回所经历的声程, $2z$ 为经过工件底面反射的声程,声波走时 t 为经历该声程所用的时间; z_1 表示工件内部缺陷距离扫描端面的深度, $2z_1$ 为经过缺陷反射的声程 p ,走时 t_1 为经历该声程所用的时间, h 代表横截面分层厚度。若超声在检测物体中的声速为 c_L ,将时域信号 $w(n)$ 转变为声程上的空间采样信号 $w(z)$ 的计算公式为

$$z = p/2 = tc_L/2. \quad (1)$$

C 扫描成像所显示的是工件某一深度的横截面图像,其成像依据是设定该深度横截面分层走时时间阀门 $[t_-, t_+]$,从回波信号 $w(n)$ 中根据走时时间阀门挑选出某一深度 z_1 的信号,则 $w(z_1) = \max(t_-, t_+)$ 。示意图如图 2 所示,分层走

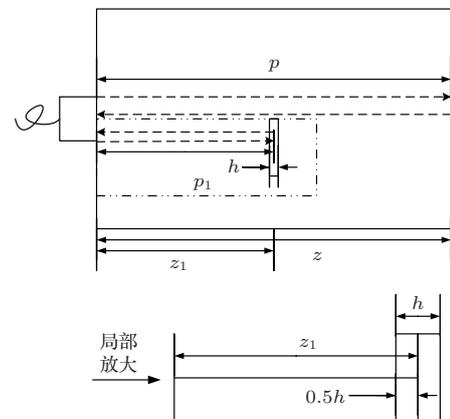


图 2 声波反射示意图

Fig. 2 The picture of acoustic reflection

时时间计算公式为

$$t_- = 2(z_1 - 0.5h)/c, \quad (2)$$

$$t_+ = 2(z_1 + 0.5h)/c. \quad (3)$$

1.2 考虑波束扩散角的端面 C 扫描检测方法

上述 C 扫描检测方法假定了探头接收的反射信号来自探头覆盖范围正下方中线附近。然而在实际检测中, 超声波波源辐射的波束并不是在波源覆盖范围内笔直辐射, 而是以特定的角度向外扩散, 并且波束扩散并非从波源起始点开始, 而是分为一个未扩散区 b 和一个扩散区, 同时会存在一个与波源轴线的半扩散角 θ , 波束未扩散区和扩散区的理想化扩散形状如图 3 所示 [8-9]。

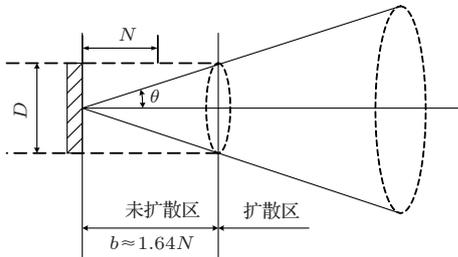


图 3 波束未扩散区和扩散区

Fig. 3 The beam non-diffusion zone and diffusion zone

在波束未扩散区 b 内, 各截面平均声压幅度基本相同, b 以外的扩散区内, 各截面的声压幅度从轴线向两侧会有所下降 [10]。描述声场分布有两个主要指标, 分别为主瓣宽度和旁瓣幅度。主瓣宽度是指两侧的声场幅值相对声束轴线方向上的极大值下降 3 dB 的宽度, 该宽度值越窄, 成像侧向分辨率越高, 故选择波束幅值下降 3 dB 来计算波束的半扩散角。假设超声波波长为 λ , 圆形晶片 (直径为 D) 的

声压幅度从轴线上的最大值分别下降 3 dB 时, 其波束的半扩散角为

$$\theta_{-3 \text{ dB}} = 29 (\lambda/D). \quad (4)$$

根据脉冲回波信号中反射回波的走时 t 计算出对应反射面沿待测工件轴向与扫描端面的距离 z , $z = t \cdot c_L/2$, 在该反射面, 声束的扩散距离 $M = z \cdot \tan \theta$, 声束覆盖圆区是直径为 $2M$ 的圆形区域, 其圆心以下称为覆盖圆圆心, 是探头中心在反射面所在工件内部横截面上的投影。

波束扩散距离和覆盖圆区示意图如图 4 所示, 以 $h(\text{mm})$ 作为每个横截面切片的深度, 并把横截面切片按照端面网格划分的方式进行相同的网格划分。设检测物体纵向深度为 $z(\text{mm})$, 端面探头 D 所覆盖的网格坐标为 (x, y) , 检测声束的扩散边界与声束中轴线之间的距离为扩散距离 M 。此处以声束向外扩散两格网格为例, 由于横截面切片是有深度的立方体, 故设声波从端面到达正下方 $z_1(\text{mm})$ 层网格上表面的最近距离, 其声波发射返回声程为 p_1 , 声波到达该网格底面边界为最远距离, 其发射返回声程为 p_2 , 同理, 向外扩散相邻网格底面边界声波发射返回的声程长度为 p_3 , 向外扩散第二个网格底面边界声波发射接收的声程长度为 p_4 。图 5 仅示意性地给出了检测声束的覆盖距离仅含有向外扩散 0 个、1 个、2 个网格的情况, 声程 p_1, p_2, p_3, p_4 根据公式 $t = p/c_L$ 计算, 所经历的走时分别为 t_1, t_2, t_3, t_4 。以此类推, 可计算各个回波信号对应检测声束覆盖圆区内声束覆盖的多个网格, 这些网格以覆盖圆圆心处的网格为中央网格, 以 L 为间距依次向外扩散的网格则形成了多个“口”字形区域, 从而将所述探头声束扩散网格化。

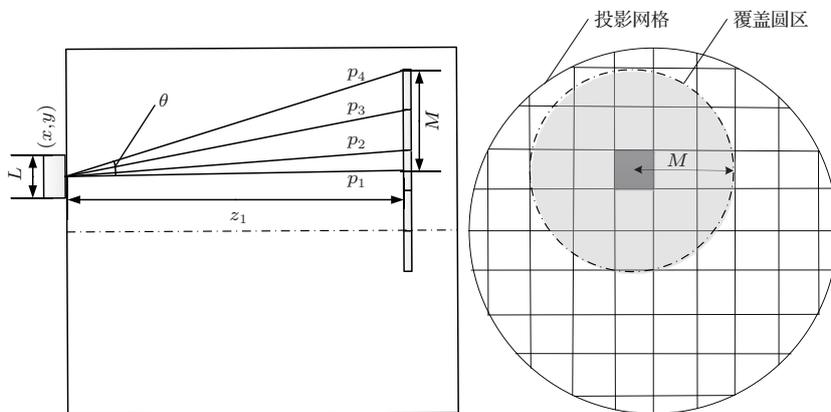


图 4 波束扩散距离和覆盖圆区示意图

Fig. 4 Beam diffusion distance and coverage circle

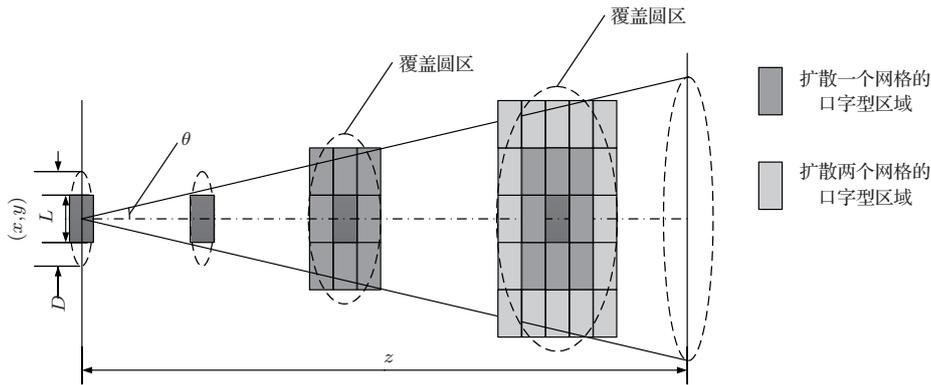


图5 波束扩散网格化示意图

Fig. 5 Beam diffusion gridding diagram

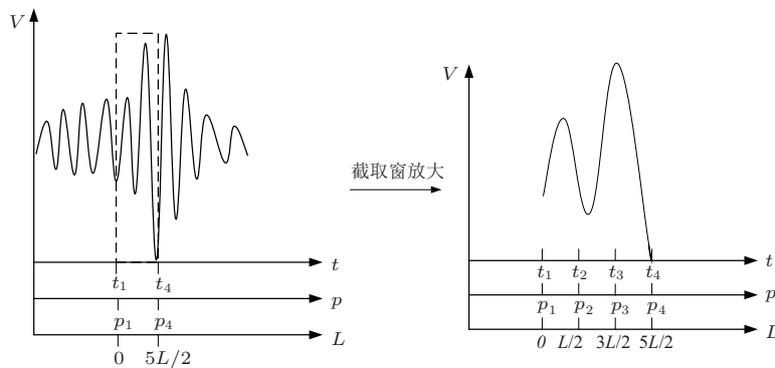


图6 声程转化和声程区间对应幅值区间示意图

Fig. 6 Sound path conversion and sound path interval corresponding amplitude interval diagram

本例考虑4个不同声程、4个走时的回波时域信号，其示意图见图6，不同深度网格最大幅值计算分为以下3种情况计算：

(1) 检测声束覆盖了直径为1个正方形网格边长的圆形区域，覆盖圆区内仅有中央网格，该网格对应的幅值为回波时域信号的最大幅值；

(2) 检测声束覆盖了直径为3个正方形网格边长的圆形区域，覆盖圆区内中央网格对应的幅值为回波时域信号的最大幅值，从中央网格起向外扩散间距 L 形成了一个口字形区域，该区域内包含的8个网格对应的幅值取回波时域信号中对应声程区间内的幅值极大值，如图6所示，即在超声回波时域信号的 (t_2, t_3) 区间内取幅值极大值；

(3) 检测声束覆盖了直径为5个正方形网格边长的圆形区域，覆盖圆区内中央网格对应的幅值为回波时域信号的最大幅值；从中央网格起向外扩散间距 L 形成了第一个口字形区域，该区域内包含的8个网格对应的幅值取回波时域信号中对应声程区间内的幅值极大值，如图6所示，即在超声回波时域信号的 (t_2, t_3) 区间内取幅值极大值。同理，从中央

网格起向外扩散间距 $2L$ 形成了第二个口字形区域，该区域内包含的16个网格对应的幅值取回波时域信号中对应声程区间内的幅值极大值，如图6所示，即在超声回波时域信号的 (t_3, t_4) 区间内取幅值极大值。

计算各个回波信号对应检测声束所述覆盖圆区内中央网格和各个“口”字形区域内网格对应的信号幅值：对于每个回波信号，将其 M 与 $L/2$ 相比较：

(1) $M \leq L/2$ 时，表示检测声束在缺陷横截面处无扩散，此时覆盖圆区仅包括中央网格，该网格对应幅值为该回波信号的最大幅值；

(2) $L/2 < M \leq (n + 1)L/2$ 时， n 为 M 除以 $L/2$ 取整，检测声束覆盖圆区内包含了中央网格、从中央网格起以 L 为间距依次向外扩散的 $n/2$ 个“口”字形区域，各个“口”字形区域内网格对应的幅值为该区域对应声程区间内的幅值极大值，从而获得所述覆盖圆区内网格化的幅值分布数据，叠加处理流程图如图7所示。

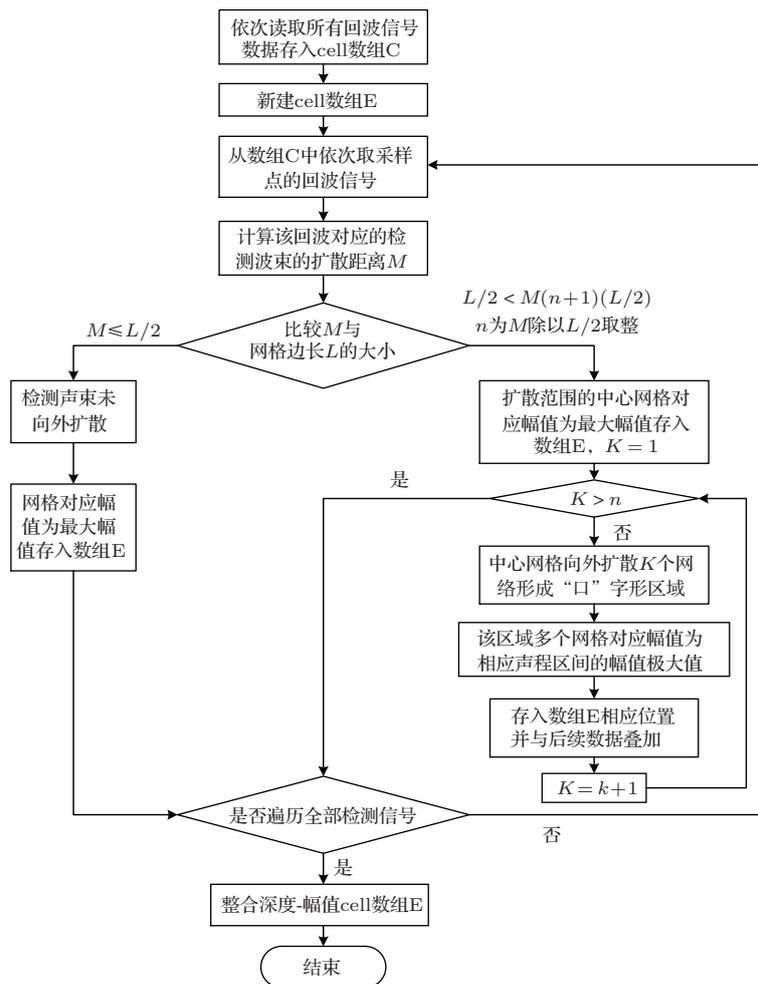


图7 叠加处理流程图

Fig. 7 Superposition processing flow chart

在网格三维坐标为 (x, y, z) 的幅值等于所有在该处接收到反射回波的端面检测点, 根据走时时间在检测信号截取的信号段最大幅值总和, 即等于在同一端面检测点, 根据走时时间在检测信号截取同一深度对应位置的信号段最大幅值总和, 波束向外扩散一格深度的网格和向外扩散两格深度的网格叠加算法公式如下:

$$E\{x, y\}(z, 1) = \sum_{x-1}^{x+1} \sum_{y-1}^{y+1} \max[C\{x, y\}(t_2, t_3)], \quad (5)$$

$$E\{x, y\}(z, 1) = \sum_{x=x-1}^{x=x+1} \sum_{y=y-1}^{y=y+1} \max[C\{x, y\}(t_2, t_3)] + \sum_{x-2}^{x+2} \sum_{y-2}^{y+2} \max[C\{x, y\}(t_3, t_4)]. \quad (6)$$

1.3 层析成像原理与伪彩色成像方法

为了精准直观地观察检测物体内部情况, 采用层析成像的方法来重建经过常规算法和叠加算法处理的检测信号数据, 形成每个横截面的伪彩色网格图像。层析成像是通过相关的检测仪器检测被测物体, 接收器接收检测物体内部信息的信号, 再利用计算机图像重建的方法, 重建被测物体内部二维或三维图像的方法^[11-12]。对处理后的超声数据进行伪彩色成像时, 将所有幅值 V 中的最大值作为 V_{\max} , 将所有幅值中的最小值作为 V_{\min} , 再根据归一化公式 $V' = (V - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min})$, 把所有幅值数据转化成 $(0, 1)$ 之间的数据, 以此作为一个索引值, 通过这个索引值在彩色查找表 (Color look-up tables, CLUT) 中, 查找出表中对应的表项入口地址, 根据查找匹配去映射出一个显示图像时使用的 RGB 强度值, 故用查找映射出的伪彩色形成彩色图像^[13]。这里只针对 R 和 B 值变换, 即幅值由

小到大对应图像颜色由蓝到红的转变。幅值归一化处理 V' 映射成 RGB 的公式和 RGB 的配色方程可表示为

$$R = V', \quad G = 0, \quad B = 1 - V', \quad (7)$$

$$[F] = R(R) + G(G) + B(B), \quad (8)$$

R 、 G 、 B 是任意彩色 $[F]$ 的三系数，其中 G 默认为 0。

对经过常规和叠加处理方法处理后的数据进行成像，构建出网格划分模型，然后遍历每个网格的每个深度的幅值信号，显示每一层横截面的伪彩色图像，从而有效地反映了每个切片横截面的伪彩色成像及检测对象内部的缺陷成像，准确的定位缺陷的位置，成像算法流程图如图 8 所示。

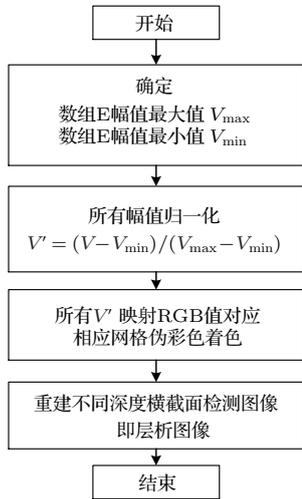


图 8 成像算法流程图

Fig. 8 Imaging algorithm flow chart

2 检测试验平台和方法

为了方便区分识别和重构图像，对端面划分的网格进行二维坐标标定，对轴向每个横截切面进行三维坐标标定。超声检测满足不低于 20% 重复率覆盖的要求，且采样点能够被探头全覆盖，正方形网格边长 L 应小于等于 $0.4\sqrt{2}$ ，对端面网格二维坐标划分的步骤如下：以扫查端面所在圆形的的外切正方形一顶点为坐标原点、所述工件轴向为 z 轴建立三维坐标系，以所述坐标原点为起点，沿 x 轴、 y 轴以 L 为正方形网格边长依次划分正方形网格，即对所述扫查端面进行正方形网格划分，共划分出 X 行 Y 列正方形网格，以行列顺序为标号，例：第一行第一列为 $(1, 1)$ ，第一行第二列为 $(1, 2)$ ，以此类推，如图 9 所示。

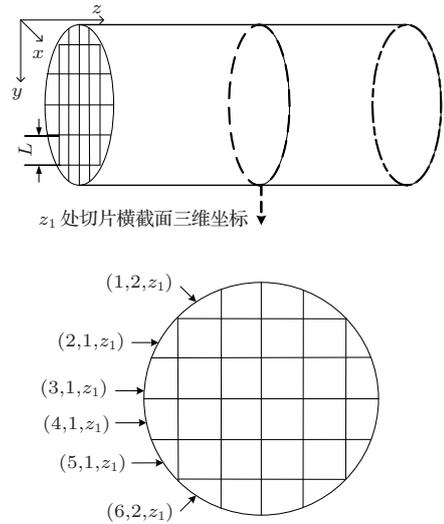


图 9 网格标定方式

Fig. 9 The method of grid calibration

为了研究超声声束扩散对超声检测大型轴类数据信噪比的影响，本文搭建了一个轴类超声检测试验平台。正常检测情况下，平底孔是声学反射比较理想一种孔型缺陷，故在本试验以 $\phi 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的直轴试块为检测对象，其底部中间有一个 $\phi 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 平底孔缺陷。

超声检测试验平台分为两部分：一部分是超声检测装置，另一个部分是超声检测数据采集模块。本试验系统使用 CTS 脉冲发生接收仪产生激励脉冲信号，通过脉冲回波法自发自收的检测方式进行检测，通过双通道差分滤波器与上位机结合对回波信号进行显示和采集存储，试验平台系统如图 10 所示。

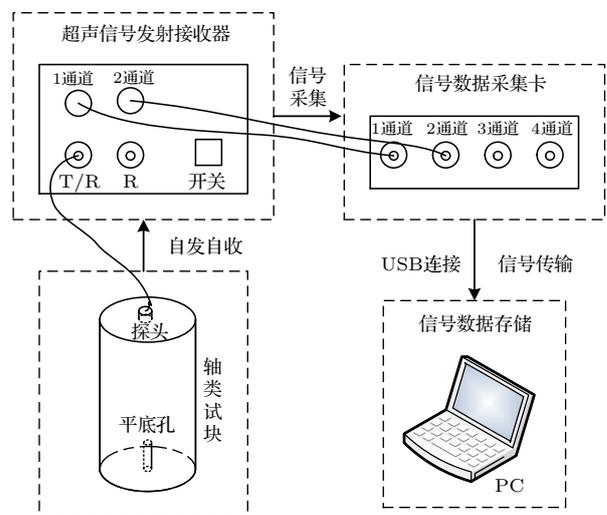


图 10 试验平台系统

Fig. 10 The system of test platform

本试验平台采用自发自收的脉冲反射法进行检测,为验证基于声束扩散数据叠加处理方法的可行性,试验了3种不同发射频率,根据不同超声探头尺寸划分网格作为超声检测采样点,由于 $\phi 12$ mm的探头划分网格较多,本实验只选取了端面中央的网格进行试验,其具体参数如下:

实验一:超声探头尺寸 $\phi 20$ mm,频率2.5 MHz,网格边长11 mm,增益48 dB,采样点60个;

实验二:超声探头尺寸 $\phi 12$ mm、频率5 MHz、网格边长6 mm、增益48 dB、采样点36个;

实验三:超声探头尺寸 $\phi 12$ mm、频率10 MHz、网格边长6 mm、增益48 dB、采样点36个。

实验步骤如下:

(1) 网格规划。结合不同超声探头尺寸,在试块端面网格划分出采样点,并按照上述网格标定方式对网格进行坐标标定,方便后期图像重构。

(2) 实验准备。实验仪器按照图10连接,设置脉冲发射器的各项参数,保证探头和试块充分耦合,

确保上位机能够采集到检测数据。

(3) 进行实验。按照网格划分的采样点依次进行检测,每个网格采样点检测的数据保存时,按照网格标定方式命名,确保采样点和检测数据一一对应。

(4) 数据处理。先依照常规数据处理方法对原始检测数据进行处理,对处理后的检测数据进行伪彩色层析成像,然后对原始检测数据进行叠加处理,重构伪彩色图像,与常规方法处理的数据和图像进行对比。

3 实验结果和讨论

本实验超声信号采集的采样频率为200 MHz,采样时长为200 μ s,采样点为40000个,内部传播声速 $c_L = 5900$ m/s,根据常规处理方法,把采集保存的时域上的时间-幅值信号图转变为空间上的声程深度-幅值信号图,从而可以直观地观察缺陷信号的深度位置,如图11所示。

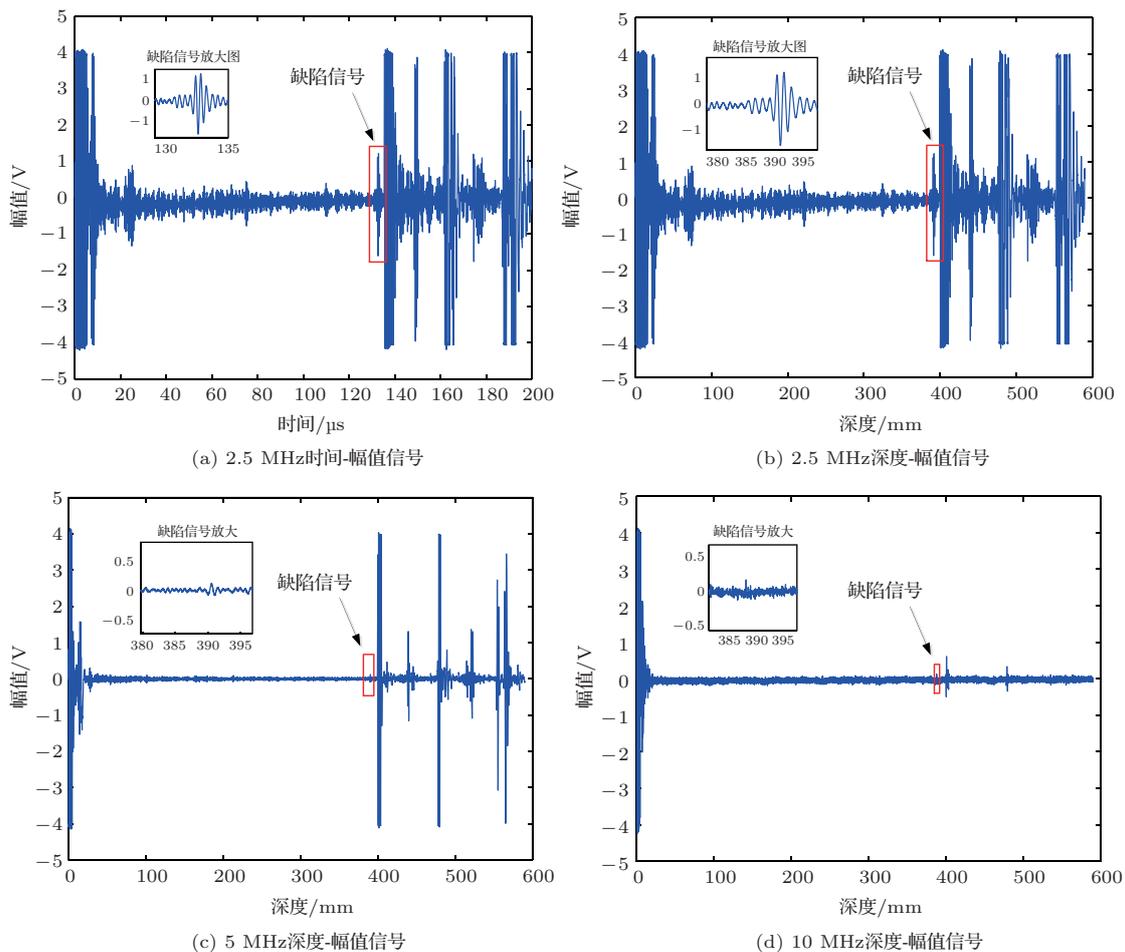


图11 超声信号波形图

Fig. 11 Ultrasonic signal waveform

本实验采用 MATLAB 对处理后的数据进行成像显示，一部分实现信号波形显示，绘制时域信号转换为声程深度信号的波形；另一部分实现层析信号重构，可以根据输入的深度，重构内部信号，呈现此深度横截面的伪彩色信号图片，可以直观地看到能够检测到缺陷信号的位置和范围。

本文分别使用了数据处理常规算法和叠加算法，并通过层析的方法来重构每个横截面内部信号的图像。本实验依照深度值一一检索成像，在 390 mm 处发现缺陷信号，计算了 3 种实验频率下，超声波在 390 mm 处的声波发射返回声程 (p_1, p_2, p_3, p_4) 以及对应的走时时间 (t_1, t_2, t_3, t_4) 的

具体值，如表 1 所示。同时重构出检测数据的为彩色图像，如图 12 所示，标红代表能够在该深度检测到缺陷的检测点位置，黄色区域内为缺陷所在位置。经过常规算法和叠加算法的成像结果对比可以看出，常规算法处理后的数据，缺陷处成像亮度较弱，不易发现，经过扩散区域的幅值叠加运算后，缺陷处成像亮度明显高于常规算法成像，可以清晰准确地呈现出能够检测到缺陷的检测点位置。采用叠加算法前后的图像对比得出，幅值叠加运算能够更好地突显缺陷信号，经验证，此方法适用于对大型轴类微小缺陷的信号处理。

表 1 390 mm 处往返声程和走时时间

Table 1 Round trip sound path and travel time at 390 mm

频率/MHz	原始幅值/mm				叠加幅值/ μ s			
	p_1	p_2	p_3	p_4	t_1	t_2	t_3	t_4
2.5	780	782.077	782.695	783.389	132.203	132.555	132.660	132.777
5	780	782.023	782.207	782.575	132.203	132.546	132.577	132.639
10	780	782.023	782.207	782.575	132.203	132.546	132.577	132.639

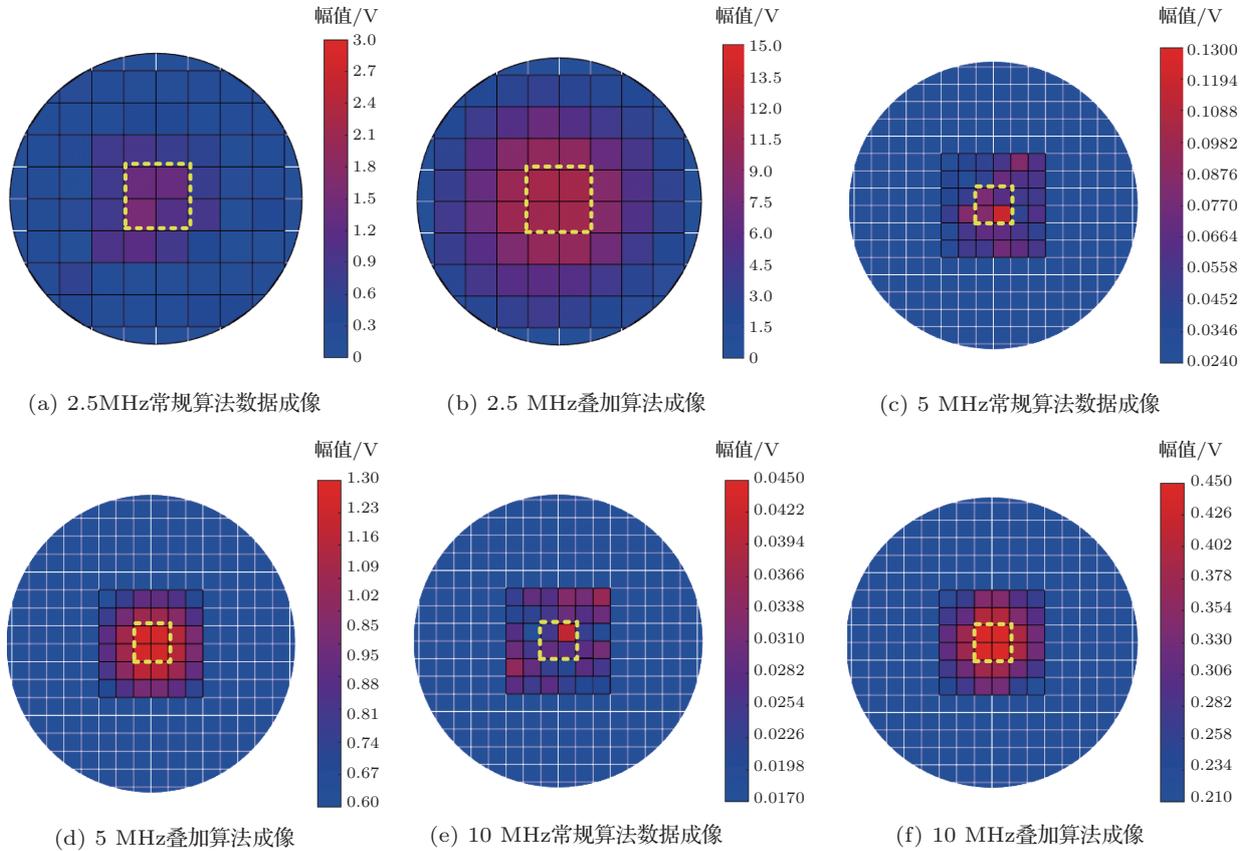


图 12 390 mm 处缺陷处成像结果对比

Fig. 12 Comparison of imaging results at 390 mm defect

网格标号为44、45、54、55是2.5 MHz探头检测实验中靠近缺陷位置的网格,网格标号为33、34、43、44是5 MHz和10 MHz探头检测实验中靠近缺陷位置的网格。表2~4为累加算法前后,3组不同检测频率在深度为388 mm、389 mm、390 mm、

391 mm、392 mm时,相应网格位置幅值信号强度的对比和幅值增益大小,数据折线图如图13所示,44、45、54、55、33、34、43、44代表原始数据,44+、45+、54+、55+、33+、34+、43+、44+代表累加后数据,经计算超声检测数据平均可以增益12 dB。

表2 2.5 MHz幅值信号对比

Table 2 2.5 MHz amplitude signal comparison

深度/mm	原始幅值/V				叠加幅值/V				增益/dB			
	44	45	54	55	44+	45+	54+	55+	44	45	54	55
388	0.39	0.31	0.83	0.66	3.46	3.62	3.03	3.05	18	21	12	13
389	1.08	0.86	1.33	1.22	7.38	7.68	7.24	7.44	16	19	14	15
390	1.62	1.31	1.95	1.91	10.98	10.99	10.67	10.82	16	18	14	15
391	0.87	1.01	1.46	1.35	10.27	9.93	9.18	9.68	21	19	15	17
392	0.47	0.52	0.97	0.77	6.41	6.27	6.03	6.05	22	21	15	17

表3 5 MHz幅值信号对比

Table 3 5 MHz amplitude signal comparison

深度/mm	原始幅值/V				叠加幅值/V				增益/dB			
	33	34	43	44	33+	34+	43+	44+	33	34	43	44
388	0.04	0.03	0.03	0.05	0.53	0.52	0.53	0.52	22	24	24	20
389	0.05	0.05	0.05	0.08	0.72	0.71	0.72	0.70	23	23	23	18
390	0.08	0.06	0.08	0.12	1.26	1.25	1.26	1.25	23	26	23	20
391	0.07	0.05	0.07	0.08	1.01	0.88	1.00	0.88	23	24	23	20
392	0.05	0.02	0.03	0.03	0.45	0.44	0.50	0.50	19	26	24	24

表4 10 MHz幅值信号对比

Table 4 10 MHz amplitude signal comparison

深度/mm	原始幅值/V				叠加幅值/V				增益/dB			
	33	34	43	44	33+	34+	43+	44+	33	34	43	44
388	0.038	0.017	0.026	0.03	0.44	0.43	0.42	0.44	21	28	24	23
389	0.028	0.017	0.018	0.02	0.46	0.45	0.44	0.45	24	29	25	26
390	0.025	0.018	0.029	0.027	0.48	0.47	0.48	0.49	25	28	28	25
391	0.035	0.022	0.026	0.025	0.44	0.45	0.46	0.46	22	27	24	25
392	0.027	0.02	0.029	0.016	0.43	0.44	0.45	0.46	25	27	24	29

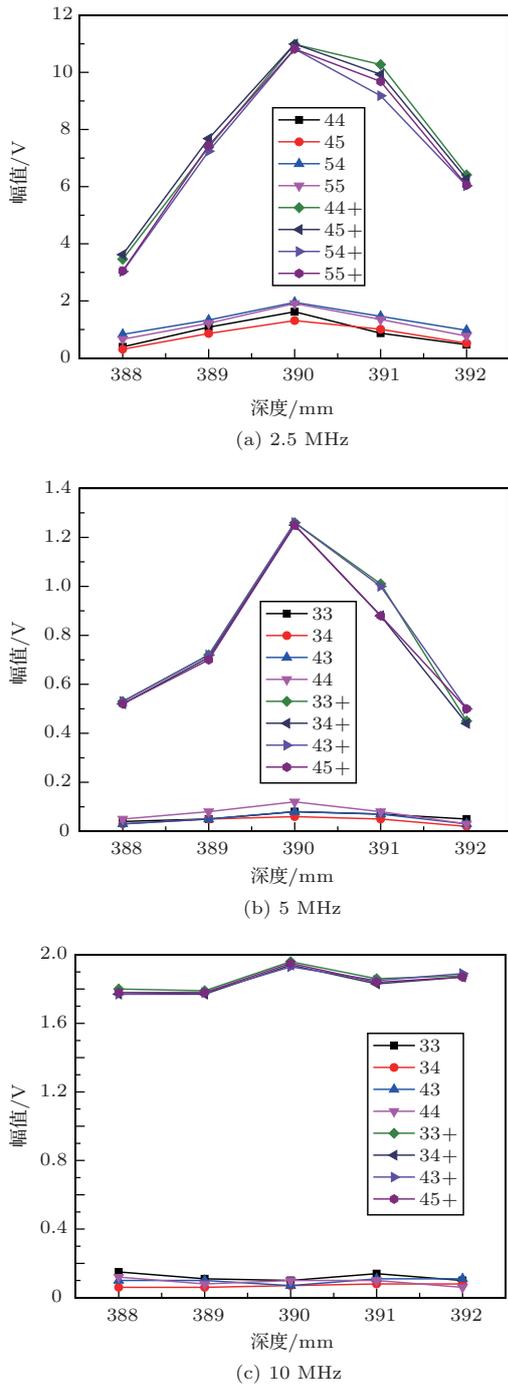


图13 叠加前后幅值信号对比

Fig. 13 Comparison of amplitude and signal signals before and after superposition

4 结论

(1) 本文针对大型轴类难拆卸、检测声程长的特点,搭建了轴类缺陷超声检测试验平台,提出了基于波束扩散的叠加算法处理超声数据。本文首先叙述了采用端面网格划分的方式来规划探头扫查位

置,通过自发自收超声反射法完成检测对象内部平底孔缺陷超声检测。然后,对采集的超声信号数据先采用常规方法处理超声检测数据,并显示出A扫描图像方便直观识别缺陷信号。接着计算声压幅度从轴线上下降3 dB时声束扩散角,并设计幅值叠加算法处理超声检测数据。最后,依据CT原理分别呈现两种方法处理的数据,重构出每个深度内部信息的伪彩色横截面图像,通过伪彩色图像能够识别出轴类内部缺陷的位置深度和范围。

(2) 使用基于波束扩散的叠加算法处理超声检测信号,处理结果表明该方法成像效果更佳,能够提高数据的信噪比,使数据增益效果达到12 dB以上,该数据处理方法为研究大型轴类缺陷超声检测信号处理提供了一种可行的方法依据。

(3) 下一步工作是在大型轴类进行实验,验证本方法在大型轴类检测的实验效果。同时本方法也存在需要改进的地方,本方法虽然对缺陷信号进行了加强,但加强的同时也会造成缺陷周边没有缺陷的地方出现缺陷指示,导致缺陷范围的扩大。后续要通过信号处理,提高信号的时域分辨率。

参 考 文 献

- [1] 苗垒. 浅谈小角度纵波直探头在轴类锻件探伤中的应用[J]. 机电信息, 2016(27): 38-39.
- [2] Li D, Ye Z, Chen Y, et al. Fatigue life analysis of the glass reinforced plastics blade of horizontal axis wind turbine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2004, 25(5): 592-598
- [3] 张开良, 张晓军, 林俊明, 等. 大直径空心轴类超声探伤系统[J]. 无损检测, 2010, 32(9): 741-743, 746. Zhang Kailiang, Zhang Xiaojun, Lin Junming, et al. Development of ultrasonic testing system for large diameter hollow shaft[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(9): 741-743, 746.
- [4] 牛卫飞, 姜斌, 韦晨. 超声相控阵在游乐设施轴类检测中的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(6): 14-17. Niu Weifei, Jiang Bin, Wei Chen. The research on testing the axis of recreational facilities by ultrasonic phased array technology[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(6): 14-17.
- [5] 宋雨珂, 汪小凯, 华林. 轴类零件内部缺陷超声检测与重构方法研究[J]. 应用声学, 2016, 35(2): 109-115. Song Yuke, Wang Xiaokai, Hua Lin. Research on ultrasonic test and reconstruction method of the internal defects in shaft parts[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(2): 109-115.
- [6] Holmes C, Drinkwater B W, Wilcox P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data

- for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [7] Schickert M. Automated ultrasonic scanning system for three-dimensional SAFT imaging of concrete elements using an electronically switched transducer array[C]. International Ultrasonics Symposium, 2012: 40-43.
- [8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001.
- [9] 樊志文, 曾新吾. 圆形活塞声源非均匀振动辐射声场的研究[C]//2012'中国西部声学学术交流会议论文集(II), 2012.
- [10] 郭伟. 超声检测[M]. 北京: 机械工程出版社, 2014.
- [11] 张培, 王浩全, 李媛. 超声CT层析成像方法[J]. 信息通信, 2011(3): 33-34.
- [12] 阎春生, 廖延彪, 田芊. 层析成像图像重建算法综述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 617-632.
- Yan Chunsheng, Liao Yanbiao, Tian Qian. Image reconstruction algorithms of computed tomography[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 617-631.
- [13] 曹茂永, 郁道银. 高灰度分辨率图像的伪彩色编码[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 115-117.
- Cao Maoyong, Yu Daoyin. Pseudo-color coding of high gray-resolution image[J]. Optical Technique, 2002, 28(2): 115-117.

◇ 声学新闻和动态 ◇

基于激光多普勒测振仪的透明固体二维动态应力场测量

激光多普勒测振仪(Laser Doppler vibrometer, LDV)是一种测量物体表面振动的仪器,被广泛应用于基础科学领域。

为得到LDV的测量值和固体中应力值的关系,中国科学院声学研究所超声技术中心左炜翌及其导师安志武等提出了一种新型测量方法,可以直接测量透明固体中的应力场。相比电测法、光弹法等传统方法,这种新型测量方法具有较高的灵敏度和直观性,可用于透明固体内超声波的观测。此外,该方法仅对动应力敏感,对静应力无响应,因此具有不受透明固体残余应力影响的优点。

相关研究成果2020年3月在线发表于国际学术期刊Journal of Sound and Vibration。

研究人员在光路中加入可旋转的线偏振片,将LDV的

测量光束转换为线偏振光,从而使光的偏振角度成为一个新的测量维度,提供更多被测量物体的信息。偏振光射入透明固体内部后,光的频率、偏振角度和固体内部应力场的各个应力分量耦合在一起。对测量结果处理后得到了固体内部应力场的精确测量结果。

研究人员用一个具有带状缺陷的K9光学玻璃块进行测试。由超声换能器激发的纵波从玻璃块顶端向下传播,并被带状缺陷散射。LDV记录下了各个时刻的弹性波图像,包括三个独立的应力分量。有限元仿真(Finite element analysis, FEA)结果验证了这种新型的测量方法。

(中国科学院声学研究所 安志武)