

超声波在内部质量缺陷的检测技术与应用

吴小勤¹ 邹宇¹ 陈凯¹ 丁一¹ 喻壮¹ 周英¹
WU Xiaomeng ZOU Yu CHEN Kai DING Yi YU Zhuang ZHOU Ying

摘要

铁路道岔动作棒作为关键机械部件，其内部缺陷可能导致严重安全事故。传统的目视检测方法效率低且难以识别内部隐蔽缺陷。基于此，文章提出了一种基于超声回波脉冲反射的沿周边扫描检测技术，针对矩形棒和圆棒进行了内部缺陷的成像与定量分析。通过高能特征点提取和图像重建技术，矩形棒内部斜缺陷的检测相对误差小于2.2%；圆棒内部孔缺陷的定位相对误差小于3%，缺陷直径检测误差小于5%，角度误差均控制在5%以内。实验结果表明，该方法有效提升了缺陷检测的效率和准确性，为道岔动作棒的安全维护提供了可靠的技术手段。

关键词

铁路道岔动作棒；超声回波脉冲反射；检测技术；孔缺陷

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.08.046

0 引言

道岔动作棒作为铁路系统中关键的机械部件，承担着引导列车换向的重要任务，其结构的完整性直接关系到铁路运行的安全性^[1]。近年来，随着铁路运输量的增加，对道岔动作棒的安全性要求也日益提高^[2]。然而，动作棒在长期使用过程中易受磨损和疲劳影响，内部缺陷如斜裂纹和孔洞等可能逐渐扩展，最终导致断裂，进而引发严重的安全事故。目前，动作棒的检测主要依赖目视检查，既费时费力又难以发现内部隐蔽缺陷，检测效果有限^[3]。为此，本研究基于超声回波脉冲反射技术，提出了一种沿物体周边扫描并分析接收信号的方法，针对矩形棒和圆棒进行了内部缺陷的成像与定量分析。通过高能特征点提取和图像重建技术，实现了对不同类型缺陷的高精度检测，旨在提高道岔动作棒缺陷检测的效率和准确性^[4]。

1 方法

1.1 矩形棒的成像原理

当超声探头扫描物体的周边时，每一侧都会产生带有部分缺陷信息的成像结果，如图1所示。以A侧的扫描图像为例，基于信号能量特征的成像结果主要显示缺陷在A方向的投影。同时，缺陷离A侧越近，图像带越明显。由于超声回波路径较短，能量衰

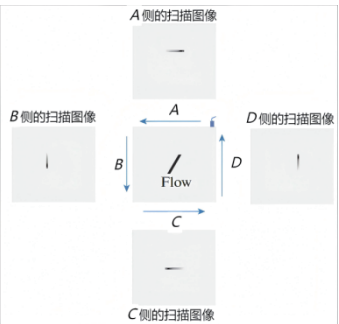


图1 单边扫描结果示意图

减小，信号携带的缺陷信息更多。其余三侧（B、C和D）类似。然而，单侧的成像数据只能揭示缺陷信息的一部分，无法进行全面测量^[5]。因此，需要进一步的信号处理。

为了分析矩形棒内部的缺陷，开发了一种高能特征点提取方法。首先，将四侧的检测图像进行能量叠加。此外，将阈值设定为最大能量的50%，并保留能量高于阈值的信号信息。对图像进行二值化突出显示缺陷周围的信息。最后，发现二值化图中的最大连通组件。

本研究中，所有连通组件通过8邻域连接技术计算，并为每个连通像素分配唯一整数。路径上有 n 组相关组件，注释范围设为1到 n ，背景像素设为0。通过组比较，保留覆盖区域内的信号信息，并将当前连通域中的最大值作为目标项。计算每个位置之间的距离，并连接距离最短的两个非零点，最终通过连接的线段表示缺陷的形状和大小。

1.2 圆棒的成像原理

如图2（a）所示，A和A'之间的角度差为 180° ，探头接收到的缺陷回波信号的能量分别为 $f(\alpha)$ 和 $f(180^\circ+\alpha)$ 。在A位置发现的缺陷区域与A'位置的缺陷区域存在重叠。由于缺陷更靠近A'，A'的回波能量低于A。建议将A和A'的信号进行叠加，以增强缺陷区域的能量特征。B和B'也是如此。然而，B和B'是特殊的位置，探头的检测区域可以覆盖整个缺陷。因此，如图2（b）所示，信号能量的叠加可以反映更完整的缺陷信息。然而，周向检测过程中产生的成像结果是极坐标形式的矩形图。因此，图像和坐标也必须进行转换。通过使用这种方法处理所有点的信号并将坐标转换为极坐标，可以获得圆棒的图像和缺陷的精确信息。假设A的极坐标为 (r, α) ，转换为直角坐标为 $(r\cos\alpha, r\sin\alpha)$ ，其中 r 为半径。

1. 武汉中岩科技股份有限公司 湖北武汉 430074

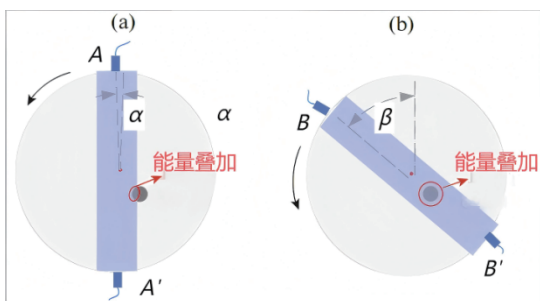


图2 圆棒成像方法示意图

2 模拟与分析

模拟模型主要包括检测探头和测试棒材。主要采用CIVA的波束计算模块。模拟对象为铁路道岔的棒材试样（棒形）。如图3展示了构建的模拟模型。其中，灰色部分代表模拟试样，试样上黄色圆柱是圆形单片超声探头，彩色区域呈现的是探头在工件内激发的超声声场。通过调整探头及晶片尺寸，能够得到不同的超声声场成像结果，进而影响检测效果。

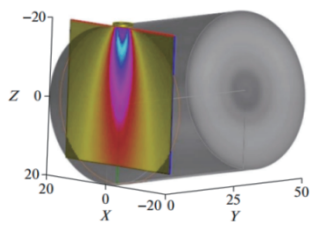


图3 棒形动作棒的模拟模型

为了分析不同探头频率和晶片尺寸对棒材材料声场特性的影响，本文通过模拟得到不同频率和晶片直径下的声场分布图。当晶片直径固定在6 mm时，2.5 MHz探头产生的超声声场较宽，检测覆盖范围大，而7.5 MHz探头形成的声束较窄，检测范围较小。其中，2.5 MHz探头声束分散，能量不够集中，5 MHz和7.5 MHz探头则在声场中心区域能量聚集明显。由此可知，探头频率越高，声场中心能量越聚焦，但有效检测范围随之减小。若将探头频率固定为5 MHz，6 mm直径晶片产生的声场虽然中心能量集中，但检测范围最小；相比之下，12 mm直径晶片激发的声场覆盖范围更广，但能量分布较为分散，中心区域能量较弱。综上所述，随着晶片尺寸的增大，声场检测范围扩展，但声能扩散加剧，难以集中于特定区域。

分析不同频率与晶片尺寸的声场图可知晶体频率下波源轴向的声压衰减规律，当固定晶片直径时，2.5 MHz的声压衰减比5 MHz、7.5 MHz更低，且声波传播越远，衰减越明显。保持探头频率不变，晶片直径增大，声压衰减程度减弱，衰减缓慢的区域也随之扩大。由此可见，高频会造成较大衰减、降低检测灵敏度，低频则易使能量发散，导致图像失真、分辨率下降。而增加晶片直径，能够有效提升检测灵敏度。

所以，选用5 MHz的频率和10 mm的晶片直径较为合适，既能全面检测不同深度的缺陷，也能准确评估缺陷位置。

3 实验与分析

3.1 试样设计

本研究根据道岔动作棒的材料和形状，设计

了两种类型的试样：矩形棒和圆棒。矩形棒尺寸为100 mm×100 mm×40 mm，设计了3个槽以模拟内部斜缺陷。第一个槽为尺寸1 mm×5 mm×30 mm，夹角60°，深度30 mm；第二个槽为1 mm×5 mm×20 mm，夹角60°，深度20 mm；第三个槽为1 mm×5 mm×10 mm，深度10 mm，夹角120°。此外，选择了一根直径为40 mm、长度为100 mm的圆棒（如图4所示），并对端面进行加工。在端面中心5 mm处，分别旋转135°顺时针，在端面顶点处理了直径为2 mm和3 mm的孔缺陷。

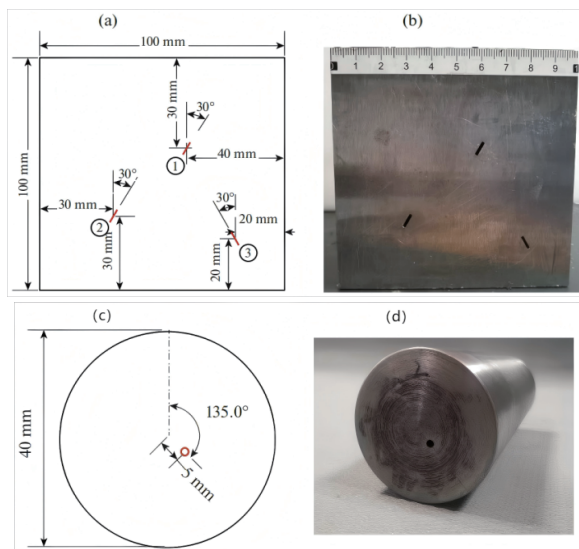


图4 含内部缺陷的矩形棒/圆棒

3.2 实验方案

实验中使用了SF580多通道数字超声缺陷检测仪，该仪器支持缺陷检测和超声信号采集，回波波形显示为A型。该仪器搭载的信息处理技术，能够实时持续记录各通道回波数据，并支持数据导出。仪器性能指标表现出色，动态范围达30 dB以上，工作频率覆盖0~15 MHz，波形采样率为10 MHz，最大增益可达100 dB，总重复率为16 kHz。此外，灵敏度裕度不低于60 dB，垂直线性度控制在3%以内，水平线性度均不超过1%。

在挑选单晶直探头的过程中，通过实验对比了普通直探头与窄脉冲直探头的检测性能。对人工矩形棒开展单次扫查，并运用线性插值补偿方法得到拟合的B扫图像。实验数据显示，窄脉冲直探头极大提升了纵向分辨率，缩小了近表面检测盲区，其较小的波束横截面积有效抑制了晶粒散射，降低散射衰减，提高了信噪比。由此可见，窄脉冲直探头能实现更高的检测分辨率与更精准的缺陷定位，这一结果与模拟数据相符。结合CIVA声场模拟结果，最终确定采用中心频率5 MHz、晶片直径10 mm的窄脉冲单晶直探头开展本研究。

为准确定位缺陷的位置和尺寸，基于超声检测仪进行了周向扫描实验，扫描路径如图5所示。图5(a)展示了矩形棒的扫描路径，扫描依次沿试样的4个侧面（A、B、C、D）

进行，每隔 5 mm 扫描一次，最后将四侧结果进行能量叠加。图 5（b）显示了棒状试样的扫描路径，从起始点逆时针沿表面移动，扫描角度间隔为 5°，通过能量叠加生成扫描图 B。

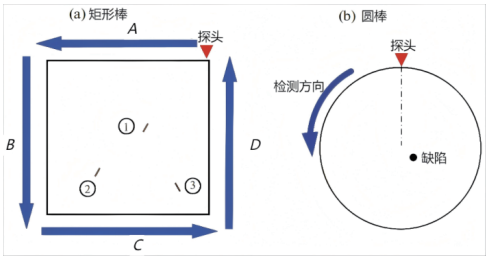


图 5 超声测试探头扫描路径示意图

4 实验结果分析

4.1 矩形棒实验结果分析

如图 6（a）所示，通过叠加不同侧面的信号能量，改善缺陷的轮廓特征。将阈值设为最大能量的 50%，提取高于该阈值的信号，进行二值化处理，最终得到的结果如图 6（b），突出显示缺陷周围的区域。最后，使用 8 邻域连接方法在二值化图中找到最大的连通组件，如图 6（c）所示。

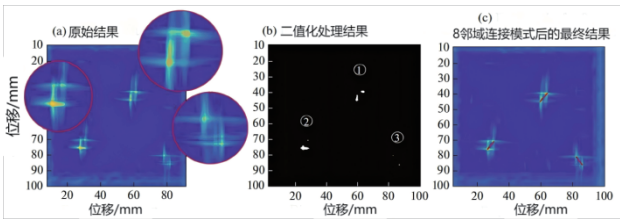


图 6 超声周向扫描的实验结果

将实验结果与 3 个缺陷的位置和尺寸的实际值进行比较，并使用式（1）确定真实值与实验结果之间的相对误差，结果如表 1 所示。实验结果和实际尺寸相比，误差在 2.2% 以内，这说明用纵波直探头检测矩形棒缺陷的方法是准确可靠的。

$$\delta_1 = \frac{|l_{o1} - l_o|}{l_o} \times 100\%$$

式中： δ_1 为相对误差； l_o 为实际值； l_{o1} 为测量值。

表 1 缺陷尺寸检测值与实际值的比较结果

编号	缺陷实际尺寸/mm	缺陷检测尺寸/mm	相对误差/%
1	5	5.09	1.8%
2	5	5.11	2.2%
3	5	5.06	1.2%

4.2 圆棒实验结果分析

2 mm 孔缺陷的 B 扫能量图如图 7（a）所示。当探头逆时针旋转 45° 时，探头中心轴线与缺陷对齐，图像中的第一个明显能量色带对应这一位置。当色带最远离缺陷时，等效深度最大。继续旋转 135°，缺陷再次与探头对齐，此时探头最靠近缺陷，色带位深最小。B 扫图中还出现了明显的色带

缺陷，因为探头接触缺陷时，部分超声波被完全阻挡并立即反射，导致相应位置的底部波非常弱甚至消失。图 7（b）显示了 3 mm 孔缺陷的 B 扫能量图，实验结果与图 7（c）相似，但 3 mm 缺陷的高幅度回波范围更大（可见色带区域），底部波遮挡现象更为显著。测试数据显示，纵波探头可有效检出棒材内部缺陷。

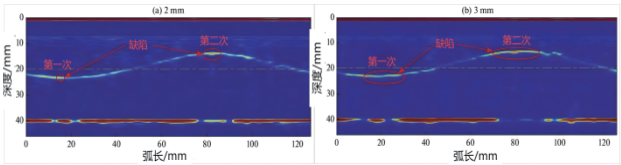


图 7 不同尺寸内部孔缺陷的实验结果

为了获得恢复图像，基于图 8 中的 B 扫结果进行了极坐标图像修改，使检测结果更加直观。整个 B 扫图按照与弧长对应的角度逆时针排序，最终实现了圆棒内部缺陷分布图的重建。

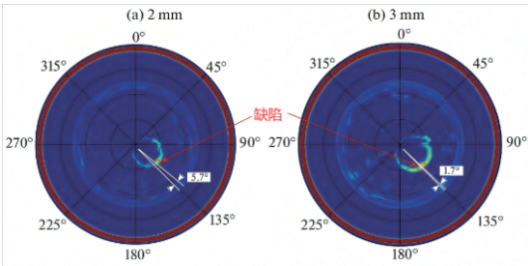


图 8 不同尺寸内部孔缺陷实验结果的重建

进一步研究了圆棒内部缺陷的检测精度，评估缺陷半径方向埋深的检测精度。表 2 显示了使用式（1）计算的相对误差。

表 2 内部缺陷回波最大振幅的位置和尺寸信息

缺陷/mm	参数	实际值/mm	检测值/mm	相对误差/%
2	靠近探头	14.0	14.26	1.82
	远离探头	24.0	23.65	1.47
	缺陷直径	2.0	2.09	4.3
3	靠近探头	13.5	13.88	2.74
	远离探头	23.5	23.20	1.29
	缺陷直径	3.0	2.92	2.73

结果显示，在定位圆棒内部孔缺陷时，实验和实际测试结果的相对误差不到 3%，缺陷直径检测误差小于 5%。实验证明，通过分析 B 扫图像，能够精准确定缺陷位置。

此外，选择恢复图中的最大恢复振幅点进行分析，以评估缺陷位置角度的正确性，结果如表 3 所示，2 mm 缺陷的位置角度误差高于 3 mm 缺陷，但总误差仍小于 5%。研究发现，借助圆棒坐标转换并分析 B 扫结果，既能有效观察超声检测成果，也能提高缺陷检测与工件截面图像的契合度，让检测结果更直观准确。

（下转第 200 页）

即在子代种群中最优的个体不会比父代最优的个体劣质，使父代优秀的个体不会在变异或交叉操作中不在，利于算法寻优，并将改进思想在程序中实现；二是提出了进化逆转操作，有效提高了算法跳出局部最优的能力。通过 MATLAB 软件编程对 TSP 实例的优化实验结果及对比分析表明，文献中最短距离为 15 383，本文设计的遗传算法当初种群值为 1 000 时，优化后的最短距离为 15 377，能够得到优于相对于其他优化算法的更短旅行路径。

参考文献：

[1] 王伟. 智能算法求解 TSP 问题的比较 [J]. 河南科技, 2018(13): 20-21.

[2] 陈劲松. 基于粒子群算法智能算法的 TSP 问题优化 [J]. 黑河学院学报, 2024,15(10):177-181.

[3] 何锦福, 符强, 王豪东. 求解 TSP 问题的改进模拟退火算法 [J]. 计算机时代, 2019(7):47-50.

[4] 向明哲. 基于改进蚁群算法的旅行商问题优化研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.

[5] 唐天兵, 朱继生, 严毅. 基于量子优化的人工蜂群算法求解旅行商问题 [J]. 大众科技, 2020,22(12):7-9.

[6] 冉令龙, 李琳, 郑学东. 基于改进禁忌搜索算法求解 TSP 问题 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2023,40(4):80-87.

[7] 王璞, 刘宏杰, 周永录. 基于改进人工鱼群算法求解旅行商问题及多点路径规划 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(35): 15090-15097.

[8] 吴映恬. 基于免疫算法的 TSP 问题求解 [D]. 苏州: 苏州大

学, 2010.

[9] 郭中华, 金灵, 郑彩英. 人工神经网络求解 TSP 问题的改进算法研究 [J]. 计算机仿真, 2014,31(4):355-358.

[10] 沈焱萍, 张学静, 吴鹏, 等. 基于遗传算法的旅行商问题求解 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2012(10):21-22.

[11] 圣文顺, 徐爱萍, 徐刘晶. 基于蚁群算法与遗传算法的 TSP 路径规划仿真 [J]. 计算机仿真, 2022,39(12):398-402.

[12] 唐文秀. 基于改进禁忌搜索算法求解 TSP 问题 [J]. 科学技术创新, 2022(4):154-157.

[13] 郁雷, 史峰, 王辉, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析(第二版)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015:205.

[14] 王超学. 遗传算法和蚁群算法及其在 TSP 问题和配电网重构问题中的应用研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2007.

[15] 燕忠, 袁春伟. 用蚁群优化算法求解中国旅行商问题 [J]. 电路与系统学报, 2004(3):122-126.

[16] 蔡荣英, 李丽珊, 林晓宇, 等. 求解旅行商问题的自学习粒子群优化算法 [J]. 计算机工程与设计, 2007(2):261-263.

[17] 程林辉. 禁忌搜索算法及其在 TSP 问题中的应用研究 [J]. 大众科技, 2013,15(165): 13-14.

【作者简介】

田茂祥(1992—)，男，贵州遵义人，硕士，助教，研究方向：优化算法、最优化理论，email: 330875061@qq.com。

(收稿日期：2025-03-28 修回日期：2025-08-04)

(上接第 195 页)

表 3 棒材试样重建图中缺陷的位置信息

缺陷 mm	真实值	检测值	相对误差 %
2	135°	129.3°	4.41
3	135°	133.3°	1.28

5 结论

本研究基于沿物体周边扫描的超声回波脉冲检测技术，针对矩形棒和圆棒进行了内部缺陷的成像与分析。通过高能特征点提取方法，矩形棒内部斜缺陷的检测相对误差小于 2.2%。在圆棒实验中，内部孔缺陷的定位相对误差小于 3%，缺陷直径检测误差小于 5%，角度误差均控制在 5% 以内。实验结果表明，采用中心频率为 5 MHz、晶片直径为 10 mm 的窄脉冲单晶直探头，不仅提升了纵向分辨率和信噪比，还实现了对不同深度缺陷的全面检测和缺陷位置的定量评估。

参考文献：

[1] 王树国. 我国铁路道岔现状与发展 [J]. 铁道建筑, 2015(10): 42-46.

[2] 江文强. 基于超声导波的高速铁路道岔可动心轨裂纹识别仿真分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

[3] 陈志超. 铁路道岔轨底超声导波探伤关键技术研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.

[4] 夏平. 转辙机动作杆缺陷超声检测信号特征提取与检测系统开发 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.

[5] 程婧婷. 基于超声与脉冲涡流技术的转辙机动作杆缺陷检测研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.

【作者简介】

吴小勤(1977—)，男，湖北武汉人，本科，工程师，研究方向：检测技术及仪器仪表研究。

(收稿日期：2025-04-25 修回日期：2025-08-07)