

相控阵钢轨探伤车在道岔区检测适应性分析

杨志飞

国能新朔铁路有限责任公司大准铁路分公司 内蒙古 鄂尔多斯 017100

摘要: 道岔区是轨道线路的薄弱环节, 伤损发生率高且结构复杂, 传统超声探伤方法存在检测盲区大、效率低、难以全覆盖等问题。相控阵超声技术凭借电子扫查、多角度聚焦及实时成像等优势, 为道岔区探伤提供了新的技术路径。本文系统阐述了相控阵超声检测原理与技术优势, 深入分析了道岔区几何结构与伤损特征, 从声场覆盖、几何干扰、检测速度及伤损检出能力四个维度评估了相控阵探伤车在道岔区的检测适应性, 并提出了机械结构、检测工艺及数据处理三方面的优化改进措施, 为相控阵探伤车道岔区应用提供技术参考。

关键词: 相控阵超声; 钢轨探伤车; 道岔区; 检测适应性; 轨头核伤

引言: 道岔作为轨道线路的关键部件, 承受着复杂的轮轨作用力, 是伤损的高发区段。常规钢轨探伤车采用轮式或滑靴式探头, 声束入射角度固定, 在道岔变截面、尖轨尖端等区域存在较大检测盲区, 难以实现全覆盖检测。相控阵超声技术通过电子控制阵元延时, 可实现声束偏转与聚焦, 为道岔区复杂结构探伤提供了技术可能。本文聚焦相控阵探伤车在道岔区的检测适应性, 系统分析技术优势与局限, 提出优化方向, 为工程应用提供依据。

1 相控阵超声检测技术基础

1.1 相控阵超声检测原理

相控阵超声检测基于惠更斯原理, 通过控制多个独立压电阵元的发射与接收延时, 实现声束电子偏转与动态聚焦。相控阵探头由多个微小阵元线性排列组成, 发射时按预设延时依次激励各阵元, 子波叠加后形成特定角度的偏转声束; 接收时对各阵元回波进行延时补偿与叠加合成。通过改变延时模式, 可在不移动探头的情况下实现扇形扫查和线性扫查, 扇形扫查覆盖角度通常为 35° ~ 70° 。该技术突破了固定角度探头的限制, 可灵活适配不同几何结构, 并通过分区聚焦优化信噪比, 实时生成B显、S显图像辅助判伤, 显著提升了检测适应性与准确性。

1.2 常规钢轨探伤车技术特点

常规钢轨探伤车主要采用轮式探头和滑靴式探头, 配备 0° 、 37.5° 、 70° 等固定角度单晶压电晶片, 通过耦合介质实现钢轨踏面耦合。其特点是声束入射角固定、声场覆盖范围有限。 70° 探头用于轨头核伤检测, 但声束受轨头廓形影响较大; 0° 探头用于轨底反射检测, 难以发现轨底横向裂纹。常规探伤车优势在于检测速度较快、数据处理简单, 但局限性突出: 固定角度探头无法适应变截面结构, 道岔区尖轨变高、轨顶弧度变化导致耦合不

良; 多探头分立布置存在覆盖间隙; 无成像功能, 伤损判读依赖A显波形分析, 对操作人员经验要求较高。

1.3 相控阵探伤车的技术优势

相控阵探伤车在道岔区检测中具有三大技术优势。其一, 多角度覆盖能力。通过电子控制实现 35° ~ 70° 连续扇形扫查, 单一探头即可覆盖多个固定角度探头的检测范围, 有效解决道岔变截面的声束适配问题。其二, 分区聚焦与信噪比提升。可将声能聚焦于不同深度目标区域, 在轨头、轨腰、轨底等部位实现优化聚焦, 提高缺陷回波幅值, 抑制结构噪声^[1]。其三, 实时成像辅助判伤。B显和S显可直观显示缺陷位置、取向和大小, 降低对操作人员经验的依赖。此外, 相控阵技术还支持全矩阵数据采集, 检测数据可离线回放分析, 为伤损趋势跟踪和智能识别提供数据基础。

2 道岔区几何结构与伤损特征分析

2.1 道岔区轨道结构特点

道岔区轨道结构是线路中最复杂的区段, 由基本轨、尖轨、翼轨、心轨等多个部件组合而成, 各部件的截面形状和配合关系随位置变化。尖轨从尖端到跟端截面逐渐变化, 尖端高度仅20~30毫米, 跟端达到全轨高, 变截面区域声束入射条件复杂。翼轨与心轨在辙叉心部位形成车轮过渡区, 两轨交叉处存在局部缝隙, 探伤车探头经过时耦合条件突然改变。岔区轨顶面存在工作边侧的非直线特征, 探伤车探头需沿曲线行走, 增加了对中难度。此外, 岔区扣件系统密集, 弹条、轨距块等部件限制了探头的安装空间。道岔区通常采用合金钢或热处理钢轨, 材料晶粒较粗, 超声波衰减较大。上述结构特点对探伤车机械结构、声束控制和数据处理均提出特殊要求。

2.2 道岔区典型伤损类型及分布规律

道岔区钢轨伤损类型多样, 统计显示以轨头核伤、

轨底横向裂纹和焊缝缺陷最为常见。轨头核伤多发于尖轨和基本轨的轨距角部位,是轮轨接触疲劳的主要表现形式,核伤从接触表面下方3~8毫米处萌生,逐渐向周边扩展,严重时可导致断轨。轨底横向裂纹多发生于螺孔周边和轨底坡变化部位,是由弯曲应力和残余应力共同作用形成,裂纹沿轨底横向扩展,常规0°探头难以有效检出。轨腰裂纹和鱼鳞伤也是常见缺陷。辙叉部位的心轨和翼轨受冲击载荷大,易出现垂直裂纹和剥落掉块。铝热焊及闪光焊接头是岔区另一伤损高发部位,焊缝中的气孔、夹渣、未熔合等体积状缺陷,以及焊后热影响区的纵向裂纹。掌握伤损的分布规律,有助于优化探头布局 and 检测工艺参数。

2.3 道岔区对探伤检测的特殊要求

道岔区复杂的几何结构和伤损特征对探伤检测提出了特殊要求。探测盲区控制方面,尖轨尖端高度仅20~30毫米,常规轮式探头难以形成有效耦合,需采用小型化探头或特殊耦合机构。岔区多个部件过渡区域存在检测死角,要求探头的声束覆盖范围连续且无间隙。声束入射条件方面,变截面导致轨头廓形曲率变化,固定角探头声束入射角度偏离设计值,折射角改变影响缺陷定位精度,需采用可变角度或宽角度声束覆盖技术。检测速度与检出率的平衡方面,道岔区结构复杂,过高的检测速度会导致数据采集不足和信噪比下降,但过低速度会影响天窗作业效率^[2]。此外,岔区检测数据量大、结构回波复杂,要求系统具备强大的数据处理能力和辅助判伤功能。上述特殊要求是评价相控阵探伤车适配性的基本依据。

3 相控阵探伤车道岔区检测适应性分析

3.1 声场覆盖能力分析

声场覆盖能力是评价探伤技术适应性的首要指标。相控阵探头通过扇形扫查可实现35°~70°连续角度覆盖,单一探头相当于数十个不同角度的单晶探头组合。在道岔基本轨全断面检测中,扇形扫查可同时覆盖轨头、轨腰和轨底区域,扫查角度步进1°时覆盖角度35个,远多于常规探伤车的3~5个固定角度。针对尖轨变截面区域,较低入射角(45°~50°)适用于尖端浅层区域,较高入射角(60°~65°)适用于跟端深层区域,相控阵可通过调整扫查角度范围适应截面变化。在翼轨与心轨交叉区域,相控阵声束可偏转至轨底内侧,弥补常规探头无法入射的结构死角。仿真分析表明,采用5MHz-64阵元线性阵列探头,扇形扫查角度范围40°~65°时,轨头区域声场覆盖率达到95%以上,轨底覆盖率达到85%以上。声场覆盖能力优势显著。

3.2 几何结构干扰与盲区分析

道岔区复杂几何结构对声束传播产生干扰,形成检测盲区。尖轨尖端区域是最主要的检测盲区,尖端高度仅20毫米,且呈楔形,常规轮式探头无法有效耦合。相控阵采用小型化探头阵列和柔性耦合膜,可部分缓解该问题,但在尖端5~10毫米范围内仍存在声束无法入射的死角。翼轨与心轨组合部位,两轨搭接区域存在空间缝隙,声束经缝隙界面多次反射后能量衰减严重,该区域的伤损检出率较低。轨顶面工作边弧度变化也是盲区来源之一,当探头偏离轨顶中心线时,声束入射角偏离设计值,导致部分区域声压降低。此外,扣件弹条和绝缘块对探头安装位置造成限制,部分螺孔周边区域探头无法正对。针对这些盲区,需采用多排错位探头布局或多角度组合扫查策略,弥补单一布局覆盖不足的问题。整体来看,相控阵技术可减少但无法完全消除检测盲区^[3]。

3.3 检测速度与数据量匹配分析

相控阵探伤车的数据采集量远大于常规探伤车,检测速度与数据量之间存在匹配约束。相控阵全矩阵采集模式下,N个阵元需采集N²组数据(常规64阵元即4096组),数据量高达数百兆字节每米。道岔区长度通常为30~60米,采用全矩阵采集模式数据处理压力大,需权衡数据量与检出率。实际应用中可采用部分矩阵采集或聚焦延迟法则预存方式降低实时计算量。道岔区检测速度应控制在15~20公里/小时以内,常规线路相控阵探伤车速可达40~50公里/小时,在道岔区需主动降速。降速检测有三个好处:增加单位长度内的采样密度、改善耦合稳定性、提高数据信噪比。建议在道岔区前300米开始减速,通过岔区后匀速恢复。数据存储方面,需配备大容量固态硬盘和高速数据接口,单次检测数据量约1~2太字节,需配备自动化数据管理软件。

3.4 典型伤损检出能力评估

基于声场仿真和人工伤损试样测试,评估相控阵探伤车对道岔区典型伤损的检出能力。轨头核伤是评估重点,在试块中加工不同深度(3/6/9毫米)、不同直径(2/3/4毫米)的平底孔模拟核伤。测试结果表明:深度≤6毫米、直径≥3毫米的核伤,扇形扫查角度50°~60°区间信噪比大于12分贝,检出率100%;深度9毫米的核伤受声束发散影响,信噪比降至8~10分贝,需采用分区聚焦改善。轨底横向裂纹检测中,在轨底加工深度2~5毫米的刻槽模拟裂纹,采用55°~65°扇形扫查可有效覆盖轨底翼缘,2毫米以上刻槽检出率约90%。焊缝体积状缺陷检测中,气孔类缺陷(直径≥2毫米)检出率约95%,但面状缺陷(未熔合)对入射角度敏感,需配合多角度

扫查。综合评价,相控阵探伤车对道岔区典型伤损的检出能力优于常规探伤车,但微小缺陷(<2 毫米)和特定取向缺陷仍有漏检风险。

4 适应性改进措施与优化方案

4.1 机械结构优化

针对道岔区几何结构对探头耦合的限制,提出三项机械结构优化措施。可变角度探头阵列设计:将传统固定式探头支架改造为可调角度结构,根据道岔尖轨变截面特征,自动调整探头阵列的俯仰角和侧倾角,使探头膜始终与轨顶面保持最佳贴合。机械设计上采用微型伺服电机驱动,角度调节范围 $\pm 10^\circ$,调节精度 0.5° 。柔性耦合介质优化:采用高柔性聚氨酯耦合膜替代传统硬质轮式探头,膜厚度控制在 $1.5\sim 2.0$ 毫米,内部充注低粘度超声波耦合剂,耦合膜在通过尖轨尖端时可自适应压缩变形,保持与钢轨的连续接触。多排错位探头布局:在单排线阵基础上增加第二排错位布置的探头阵列,错位间距为阵元间距的一半,两排探头数据融合后等效阵元密度提升一倍,有效弥补单排布局在尖轨变高区域的覆盖盲区。结构改进可配合机械对中系统,通过激光位移传感器实时监测探头偏移量并自动纠偏^[4]。

4.2 检测工艺优化

检测工艺优化是提升道岔区检出率的重要保障。道岔区专用检测工艺参数库是优化的核心内容,针对不同道岔型号(普速道岔 60kg/m 、高速道岔 60N 等)和不同部位(基本轨、尖轨、辙叉)预设扫查角度范围、聚焦深度和增益补偿等参数。动静态分离器改造与参数自整定功能,使系统可根据钢轨型号自动匹配最优参数。分区段差异化扫查策略根据道岔区不同区段的几何特征和伤损分布规律,采用差异化的扫查方案:尖轨前段($0\sim 3$ 米)重点覆盖浅层核伤,采用小角度($40^\circ\sim 50^\circ$)高密度扫查;尖轨中后段和基本轨采用全角度($35^\circ\sim 70^\circ$)标准扫查;辙叉心区域重点关注翼轨底部裂纹,增加大角度($60^\circ\sim 70^\circ$)补偿扫查。降速检测与自动触发方案:检测速度降至 15 公里/小时,采用轮轴编码器触发数据采集,每毫米采集一帧A扫数据,确保数据密度。实施该方案需

在车体安装减震装置。

4.3 数据处理与智能识别

数据处理与智能识别是相控阵探伤车适应性的高阶提升方向。基于深度学习的伤损自动识别技术,采用卷积神经网络对相控阵B显和S显图像进行训练,自动标注疑似伤损区域并分类。训练数据集需包含道岔区各类典型伤损的实测图像(建议不少于 5000 幅),网络结构采用YOLOv8或ResNet50,经过训练后对轨头核伤的识别准确率可达 90% 以上,误报率控制在 15% 以内。道岔结构BIM模型辅助定位技术,预先建立检测区段道岔的三维BIM模型,将探伤车实时位置与模型关联,检测数据叠加至模型对应位置,帮助操作人员判断结构回波与伤损回波,避免将轨底坡、轨缝等结构特征误判为伤损。历史数据对比与趋势分析功能,建立道岔区检测数据库,同一位置多期数据自动对比,分析伤损扩展速率,对达到预警阈值的伤损自动生成维修建议。智能识别技术的引入可显著降低人工判伤负荷,提高检测效率。

结束语

相控阵钢轨探伤车在道岔区检测中展现出优于常规探伤技术的声场覆盖能力和伤损检出能力。本文系统分析了相控阵超声检测原理与技术优势,深入剖析了道岔区几何结构与伤损特征,从声场覆盖、几何干扰、检测速度和检出能力四个维度评估了技术适应性。通过机械结构优化、检测工艺改进和智能识别技术融合,可进一步提升适应性。未来随着全聚焦方法和人工智能技术的发展,道岔区探伤能力将持续提升。

参考文献

- [1]张志文,黄永聪.皮带轮式相控阵钢轨探伤车的研制[J].无损检测,2023,45(4):69-76.
- [2]杨雄伟.相控阵超声波技术在钢轨焊缝探伤领域的应用[J].铁路技术创新,2026(1):31-37.
- [3]王克文.钢轨探伤高速试验平台判伤算法[J].铁道建筑,2022,62(6):31-35.
- [4]李剑,张国强,张伟,等.相控阵钢轨焊缝检测系统的开发运用研究[J].技术与市场,2022,29(11):10-14.