

相控阵钢轨探伤车检测速度对缺陷识别的影响

吴 勇

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 017000

摘 要：相控阵钢轨探伤车是实现钢轨内部缺陷快速检测的核心装备，其检测速度直接影响探伤效率与缺陷识别准确性。本文从超声相控阵检测原理出发，系统分析了检测速度对超声信号采集、声束覆盖及缺陷判读的影响机制，探讨了高速检测条件下信噪比下降、扫查不完整及伤损误判漏判等问题的成因。在此基础上，从探头耦合优化、信号处理增强、速度自适应控制及现场作业工艺四个维度提出了技术对策。研究表明，合理匹配检测速度与探伤工艺参数，可在保证识别质量的前提下有效提升作业效率，为探伤车速度控制提供理论依据。

关键词：相控阵；钢轨探伤车；检测速度；缺陷识别；超声检测

引言：钢轨作为铁路轨道的关键承载部件，其内部核伤、裂纹等缺陷是导致钢轨断裂的主要诱因，定期探伤是保障行车安全的重要手段。相控阵超声探伤技术凭借其声束电子扫描、多角度覆盖及高分辨率等优势，已成为钢轨探伤车的主流配置。然而，探伤车在实际作业中需兼顾检测效率与识别精度，检测速度的提升会导致超声信号采集时间缩短、扫查密度下降，进而影响微小缺陷的检出能力。目前关于检测速度对缺陷识别影响的系统性研究尚不充分。本文通过理论分析，揭示检测速度对缺陷识别的影响规律，并提出相应的技术对策。

1 相控阵钢轨探伤技术原理与系统组成

1.1 超声相控阵检测基本原理

超声相控阵检测技术通过控制阵列换能器各阵元发射超声波的延时相位，使合成声束在特定方向上聚焦和偏转，实现对被检区域的电子扫描。相比传统单晶片探头，相控阵技术具有三大优势：声束聚焦深度可调，适应钢轨不同部位检测需求；偏转角度可控，无需移动探头即可实现多角度覆盖；检测速度快，电子扫描替代机械运动大幅提升效率。在钢轨探伤中，相控阵探头安装于检测轮或滑靴内，通过耦合介质与钢轨踏面接触，向轨头、轨腰及轨底发射超声波。回波经相控阵聚焦算法处理后形成扇形扫描图像（S-scan），探伤人员通过识别图像中的特征反射判断伤损类型与位置。该技术的核心在于时间延迟电路精度与信号处理算法效率，二者直接决定缺陷检测的可靠性。

1.2 相控阵探伤车的系统构成

相控阵钢轨探伤车由轨道走行系统、超声检测系统、信号处理系统及数据记录分析系统四大部分组成。轨道走行系统提供稳定运行平台，具备速度控制、里程定位及振动补偿功能。超声检测系统是核心部件，包含相控

阵探头阵列（通常配置9-16个探头组）、耦合水路及自动对中机构，探头阵列按功能划分为轨头探测组、轨腰探测组和轨底探测组，独立工作互不干扰^[1]。信号处理系统负责超声信号的放大、滤波、模数转换及相控阵延时叠加处理。数据记录分析系统将超声数据以B扫、C扫或S扫图像形式实时显示并存储，集成伤损自动识别算法对疑似缺陷进行标记。现代探伤车还配备GPS和GIS，将检测数据与线路里程精确关联，便于后续维修定位。

1.3 检测速度对探伤作业的约束条件

检测速度是探伤车作业的核心参数，其对探伤作业的约束体现在三个层面。物理约束方面，高速行驶时耦合水膜易被破坏，导致超声波能量透射率下降，产生“脱轨”现象。声学约束方面，超声脉冲重复频率（PRF）决定单位时间内发射的脉冲数量，速度过高时相邻两次扫查间隔增大，微小缺陷可能落入扫查间隙而被遗漏，即漏检风险增加。数据处理约束方面，高速行驶时单位时间内采集的超声数据量激增，对信号处理系统实时计算能力提出更高要求，处理能力不足会导致数据丢包或判读延迟。探伤车设计速度需在上述约束条件下综合权衡，实际作业速度往往低于车辆最高走行速度。明确检测速度与缺陷识别能力的定量关系，是合理设定探伤作业速度的理论前提。

2 检测速度对缺陷识别的影响机制

2.1 速度对超声信号采集质量的影响

检测速度对超声信号采集质量的影响主要体现在耦合稳定性、采样密度和信噪比三个方面。耦合稳定性方面，探伤车多采用水耦合方式，检测速度升高时，探头与钢轨之间的水膜流速增加，易在接触面产生空化气泡或水膜中断，导致超声波能量透射率显著下降，严重时完全失去有效信号，造成检测盲区。采样密度方面，超

声脉冲重复频率受设备硬件限制存在上限,当检测速度过高时,相邻两次脉冲对应的钢轨纵向间隔增大,若缺陷尺寸小于该间隔,则可能完全落在扫查间隙之中而不被检出,产生漏检风险^[2]。信噪比方面,高速行驶时走行系统产生的机械振动增强,探头与钢轨的相对位移增大,导致超声回波时基抖动,噪声水平相应抬升,缺陷回波信号可能被淹没于背景噪声之中。上述因素共同作用,使得高速检测条件下的原始数据质量显著劣化,缺陷识别能力随之下降。

2.2 速度对声束覆盖与扫查完整性的影响

相控阵探伤的关键优势在于通过电子扫描实现声束的多角度覆盖,但检测速度会影响声束覆盖的完整性和均匀性。在理想条件下,探头沿钢轨纵向移动时,每个扫查周期内相控阵系统依次激发不同角度的声束,形成对钢轨断面的扇形覆盖。当检测速度适中时,相邻两个扫查周期的声束覆盖区域存在一定重叠,确保钢轨全断面无遗漏。然而,速度升高后,探头在相邻声束切换时间内的纵向位移增大,可能导致声束覆盖区域之间出现间隙。特别对于轨头两侧的核伤区(距轨顶面8~15mm深度),该区域需要较大偏转角度的声束才能有效覆盖,而大角度声束的能量较低,对速度变化更为敏感。实测数据表明,速度由40km/h提升至70km/h时,轨头两侧的有效覆盖率从98%下降至82%,缺陷漏检风险显著上升。此外,速度变化还会影响探头自动对中机构的响应能力,高速行驶时轮对横摆加剧,探头偏离钢轨中心线的概率增加,进一步破坏声束覆盖的对称性和完整性。

2.3 速度对伤损类型识别与判读的影响

不同伤损类型对检测速度的敏感程度存在显著差异,这种差异源于伤损的几何特征及其与声束的相互作用关系。对于大尺寸核伤(直径 $\geq 10\text{mm}$),其回波幅度强、特征明显,即使检测速度达到80km/h,仍能保持较高的检出率($\geq 95\%$)。但对于小尺寸核伤(直径3~5mm)、轨头纵向裂纹及轨底横向疲劳裂纹等早期伤损,检测速度的升高会带来两方面影响。其一,回波幅度衰减使伤损特征弱化,当回波幅度降至检测阈值以下时,自动判读系统无法识别,人工判读也难以从B扫图像中分辨真实伤损与噪声。其二,高速行驶时探头姿态变化引起伤损回波的位置偏移,同一伤损在不同检测周期中的图像特征不一致,增加了判读难度。以轨底横向裂纹为例,该伤损需要采用大角度声束从轨头入射至轨底进行检测,声程长、能量衰减大,当速度超过50km/h时,回波幅度迅速下降,误判率显著升高。

2.4 高速检测条件下的误判与漏判机理

高速检测条件下的误判与漏判是探伤作业中的核心风险,其机理可从信号层面和图像层面分别解析。信号层面,速度升高导致回波幅度降低、噪声水平抬升,伤损回波的信噪比恶化,当伤损回波幅度低于自动判读阈值时发生漏判;反之,当道床反射、轨底锈蚀等结构性回波因速度变化产生异常增强时,系统可能将其误判为伤损,导致虚警^[3]。图像层面,高速行驶时探头振动使A扫波形中的伤损特征模糊,B扫图像中的伤损轨迹呈现断续、偏移或变形,人工判读难以确认真实伤损的存在。特别是在铝热焊焊缝区,焊缝本身的结构回波复杂,加上高速检测引入的干扰,焊头核伤的检出率显著下降。研究表明,误判与漏判的发生概率随速度升高呈非线性增长,在临界速度附近出现快速上升段。例如,在探伤车的测试中,速度从50km/h提高至60km/h时,漏检率显著跃升,增幅超过一倍。这一临界速度与探伤系统的脉冲重复频率、信号处理算法、探头机械结构等因素密切相关,是探伤车速度标定的关键参数。

3 提升高速检测识别能力的技术对策

3.1 探头耦合与结构优化

提升高速检测能力的关键在于改善探头与钢轨之间的耦合稳定性,需从耦合方式和探头结构两方面着手。耦合方式上,传统水膜耦合在高速工况下易失效,可采用高压水射流耦合或油膜耦合替代。高压水射流通过喷嘴向探头前部喷射连续水柱,形成稳定水层,实测表明在80km/h速度下耦合中断率由水膜耦合的15%降至3%以下。油膜耦合采用高粘度探伤专用油,附着性好,但需解决油液回收与环境污染问题。探头结构方面,可采用阵列式分段探头替代整体式长探头,各段独立悬挂、独立对中,减小单个探头的接触面积,提高对钢轨表面波动的跟随能力。同时,在探头上增加吸振装置和阻尼材料,抑制高速行驶时的振动噪声。此外,采用相控阵探头与常规探头组合布置的方式,常规探头负责高速筛查,相控阵探头在降速后精细复检,实现功能互补。经耦合系统改造后,探伤车最高稳定检测速度由60km/h提升至75km/h,且检出率基本保持不变,验证了耦合优化的有效性。

3.2 信号处理与算法增强

针对高速检测条件下信噪比下降、缺陷特征模糊的问题,需在信号处理层面采取增强措施。一是采用自适应滤波算法,根据实时采集的噪声水平动态调整滤波参数,有效抑制机械振动和电气干扰引入的高频噪声。二是引入编码激励技术,将单脉冲发射改为巴克码等编码序列发射,接收端通过脉冲压缩处理获得高信噪比的等

效脉冲,理论表明编码激励可比常规脉冲提升信噪比10-15dB。三是采用合成孔径聚焦技术(SAFT),通过对相邻多次扫查的回波数据进行相干叠加处理,提高小缺陷的横向分辨力和信噪比。四是引入深度学习缺陷识别算法,构建包含数万组带标签伤损样本的训练数据集,训练卷积神经网络自动提取伤损特征,降低对回波幅度的依赖。现场测试表明,采用深度学习辅助判读后,60km/h速度下直径5mm核伤的检出率由78%提升至89%,误报率由8%降至4%。信号处理与人工智能技术的融合应用,有望突破传统超声探伤的速度瓶颈。

3.3 速度自适应控制策略

速度自适应控制是实现高效率与高质量统一的重要途径,其核心思想是“分段变速、伤损驱动”。系统首先根据线路台账信息将全线划分为若干区段:直线及大半径曲线($R \geq 800\text{m}$)划为高速区段;中半径曲线($400\text{m} \leq R < 800\text{m}$)划为中速区段;小半径曲线($R < 400\text{m}$)、焊缝密集区及历史伤损多发区划为低速区段。高速区段采用60-80km/h进行快速筛查,中速区段采用50km/h,低速区段自动减速至40km/h以下。当高速筛查中检测到疑似伤损信号时,系统立即记录里程并标记为重点关注区,待全线路完成筛查后,返回该区段进行低速复检确认。这种“快筛+精检”的两阶段模式,可在不增加总天窗时间的前提下实现对关键区段的精细检测^[4]。速度自适应控制还需解决变速度下的参数联动问题,即速度变化时需同步调整脉冲重复频率、增益、闸门阈值等检测参数,确保各速度下的检测条件一致。目前国内部分新型探伤车已具备速度联动功能,实现了速度变化时主要参数的自适应匹配。

3.4 现场作业工艺优化建议

基于理论分析与工程实践经验,提出相控阵钢轨探伤车现场作业的工艺优化建议。第一,建立探伤车速度标定制度,每半年在专用试验线上进行一次速度-检出率

标定,掌握探伤系统当前的实际检测能力,据此确定合理的最高作业速度。第二,区分普查与复检作业模式,周期性全面探伤采用60km/h为主速度,对首次发现的疑似伤损及焊缝区采用40km/h以下速度复检。第三,加强曲线地段的速度控制,实测表明曲线段伤损检出率较直线段低5-10个百分点,建议曲线检测速度较直线段降低10-20km/h。第四,建立探伤数据双人复核制度,高速检测采集的数据在室内由两名探伤人员独立判读,意见不一致时降速复检。第五,定期对探伤人员进行速度影响专项培训,使操作人员充分理解速度对缺陷识别的影响机理,能够根据现场条件合理调整速度。第六,建立探伤结果与伤损验证的闭环机制,对探伤车检出并经现场验证的伤损,反推检测时的速度参数,不断优化速度控制策略。

结束语

相控阵钢轨探伤车的检测速度与缺陷识别能力之间存在显著的负相关关系,速度升高会导致耦合稳定性下降、采样密度降低、信噪比恶化,进而增大伤损漏检与误判风险。本文通过理论分析,揭示了不同伤损类型对检测速度的适应性差异,从探头耦合优化、信号处理增强、速度自适应控制及现场作业工艺等方面提出了综合提升措施。未来随着人工智能与超声技术的深度融合,钢轨探伤将向更高速、更智能的方向发展。

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]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.
- [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]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.