

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905684

重载铁路钢轨相控阵探伤系统研究

兰晓峰¹, 张 渝²

(1. 准能集团大准铁路公司 内蒙古 017100; 2. 北京主导时代科技有限公司 北京 100070)

摘 要:重载铁路因具有大轴重、高运量、高行车密度等特点,加之运量的持续高位运行,钢轨伤损数量增多,种类复杂化,给铁路的高效运行留下了安全隐患。中国重载线路在用的大型钢轨探伤车由于对轨头核伤的检出率只能达到30%~40%,因此重载线路钢轨探伤主要依赖探伤仪,利用列车间隔或天窗点进行作业,检测速度慢,对操作人员要求高,存在较大的人身及线路安全风险。本文研究一种新型的基于相控阵超声波探伤技术的高速钢轨探伤车,可实现检测速度80 km/h以上,兼容所有线路轨型特点,同时兼顾智能判伤、实时报警、三维直观化显示等功能需求,实现提高缺陷检出率及工作效率、减少用工、提升安全保障水平的目的,对提升我国重载铁路钢轨探伤技术水平具有重要意义。

关键词:重载铁路;高速钢轨探伤车;快速相控阵超声技术;智能判伤算法;线路适应性

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Research on heavy haul railway inspection system based on the phased array technique

Lan Xiaofeng¹, Zhang Yu²

(1. Zhuneng Group Dazhun Railway Company, Inner Mongolia 017100, China; 2. Beijing lead time Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Due to the heavy axle load, high traffic volume and high traffic density, as well as the continuous high traffic volume, the number of rail detection increases and the types become more complicated. These factors bring some hidden troubles for the safe operation of the heavy haul railway. The detection rate of the rail head transverse defect by the large rail inspection car, which used in China for the heavy haul railway, can only reach 30%-40%. The detection mainly relies on hand push defect detector. Its detection speed is slow and has high requirements on the operator, which bring high safety risk for operator and line. A new type of high speed rail inspection car based on the fast phased array ultrasonic technique is studied in this paper. The new car has some advantages, including the maximum speed of up to 80km/h and functions of intelligent detect classification, real-time alarm and three-dimensional visual display. It is compatible with different heavy haul railway profiles. The detection rate, work efficiency and safety protection level are improved. More importantly, it is of great significance to improve the technical level of rail inspection for China's heavy haul railway industry.

Keywords: heavy haul railway; high speed rail inspection car; fast phased array ultrasonic technology; intelligent detect detection algorithm; rail line adaptability

0 引 言

重载铁路作为铁路线路重要组成部分对铁路运输能力提高具有重要推动作用,重载线路钢轨在高密度及大载荷列车冲击下极易产生损伤并迅速发展,严重情况下轻伤轨可在1~2 d时间内发展成为重伤轨^[1]。重载铁路

钢轨中常见缺陷类型包括轨头核伤、轨腰裂纹、轨底腐蚀、焊接缺陷等。通常采用无损检测及评估技术^[2-3],保障铁路维修质量和列车运行安全。

目前国内重载铁路钢轨探伤主要以探伤仪为主,作业方式效率低下(仅2~3 km/h)且成本高,利用列车间隔作业存在较大的人身安全隐患。当前大型钢轨探伤车虽对轨腰纵向水平裂纹、螺栓出率较高,但受现有常规超

声探伤技术及系统超声布局局限,对中不良、扎轮等因素的制约,大型钢轨探伤车对占重载铁路钢轨伤损约 60% 的轨头核伤检出率较低,约为 30% ~ 40%,尤其在 75 kg/m 轨的运用中更为突出^[4]。

国际上主流的大型超声波钢轨探伤车包括滑靴式、轮式和皮带轮式 3 种^[5]。滑靴式探头布局结构简单,对接头错牙要求高,且硬接触造成轨面包裹性差,不适用于普通线路。轮式探头布局可实现保护探头晶片的同时对钢轨表面的包裹性更佳,但长期使用中发现该探伤车受探头布局及安装方式的局限,存在对中不良、易扎轮等问题。皮带轮式兼顾滑靴式与轮式优势,在确保探头晶片不磨损及对钢轨表面包裹性的同时,不会出现扎轮停车的问题,同时采用自动伸缩轴式机械对中方式,在高速运动过程中对中效果稳定。

上述国内外现有的钢轨探伤车主要采用常规超声探伤技术,由于声束角度单一、覆盖区域有限等原因,对轨头核伤检出率低的问题较为突出。而且国外铁路车流密度相对较低,在保证检出率的前提下检测速度只有 40 km/h 左右,远达不到国内车流密度较大的货运铁路需求(60~80 km/h)。因此直接引进国外常规超声探伤技术的钢轨探伤车无法满足我国重载铁路钢轨探伤的需求。

1 探伤系统简介

1.1 系统组成及各部分功能

本文提出的满足重载线路检测的钢轨探伤车主要由 7 个部分组成^[6],系统框架如图 1 所示。其中大车由牵引车和检测车组成,最高运行速度 120 km/h;检测小车具备自动伸缩轴功能,在轨道上满足 ± 5 mm 自动对中效果;超声检测系统采用快速相控阵技术和常规超声技术相结合方式实现不同轨型超声全覆盖;钢轨表面图像系统监控钢轨表面状态^[7-8],实现钢轨表面图像检测;人机交互系统配置、参数调整、检测结果 A/B 型显示,轨面图像同步展示等,利用自动判伤算法对伤损自动识别、分级报警;水电气控制系统负责检测小车的运动控制及状态监控;视频监控系统,负责对检测小车及探伤系统的实时监控功能。

1.2 系统解决的关键问题及解决方案

本文提出的满足重载线路检测的高速钢轨探伤车就以下关键问题给出了相应的技术路线。

1) 转向架式探轮机构在高速检测时容易受到轨轮相对运动影响,偏离轨面中心,曲线地段更严重。造成探头入射点发生变化,声束在钢轨内的覆盖区域与理论效果有偏差。

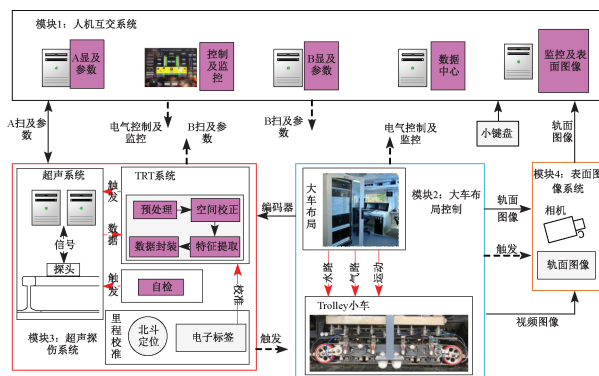


图 1 高速钢轨探伤车组成

Fig.1 Composition of high speed rail inspection car

解决方案:采用在车体两个转向架之间的位置安装检测小车,探伤系统挂载在检测小车上,检测小车采用自动伸缩轴式结构确保导轮轮缘与钢轨内侧的保持贴合状态,运动状态下自动对中偏差不超过 ± 5 mm。

2) 由于轮式探头超声角度定型后很难改变,针对 60 kg/m 和 75 kg/m 轨头外形轮廓差异较大,加之实际重载线路钢轨磨损严重,现有的声束配置很难满足两种轨型的兼容覆盖,造成轨头核伤漏检严重。

解决方案:利用相控阵探头可同时产生多个扫查角度、聚焦法则配置灵活等特点,在不更换探头的前提下实现对不同类型及磨损状态的钢轨超声检测要求,如图 2 所示。基于快速相控阵技术的相控阵探伤技术,可并行发射/接收相控阵探头的多个扫查角度数据,该技术在提高检测覆盖率的同时达到并行常规检测通道具备的高速处理能力^[9]。

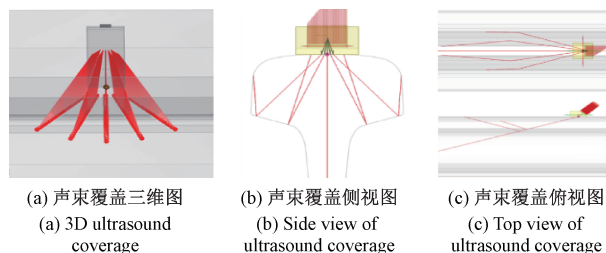


图 2 快速相控阵超声多角度覆盖轨头

Fig.2 Fast phased array ultrasonic multi-angle coverage of rail head

3) 未能有效实现智能判伤、自动报警和直观显示等功能,显示结果有待改良。

解决方案:采用伤损智能识别技术,可自动识别并提取回波位置、回波闸门、回波采样个数及走向、回波数据包所处位置的周边信息。通过提取的这些特征值实现对伤损的分类、分级的自动报警^[10]。

2 方案实现及验证

2.1 相控阵超声布局方案及验证

中国国内重载线路中造成断轨最主要的原因是轨头核伤,占断轨总数的一半^[11]。现有钢轨探伤车采用直打 UT70°探头能很好检测轨头中间部位核伤;采用倾角 UT70°探头二次波检测轨距角处核伤(距轨面 8~12 mm 和距轨侧 5~10 mm 处)检出率不足总数 1/3^[12-13]。

1) 相控阵超声布局方案

轨距角处核伤漏检原因主要如下:(1)钢轨探伤车倾角 UT70°探头的倾斜角度为 18°固定值,60 kg/m 轨鄂与轨面的倾斜角是 18.4°,超声波经过轨鄂二次反射后能很好覆盖轨距角处;75 kg/m 轨鄂与轨面的倾斜角是 14°,超声波经过轨鄂二次反射后未能很好覆盖轨距角处并导致盲区,是形成轨距角处小核伤漏检的主要原因^[14]。(2)钢轨探伤车在过弯道时探伤载体发生对中偏离(偏离程度与探伤速度、弯道半径和探伤载体轴距有关)、轨面状况不良(磨损、掉块等)导致超声在轨面的入射点和轨鄂的反射点位置发生变化,二次波偏离轨距角覆盖范围减少。以上原因出现后的超声覆盖情况如图 3 所示。

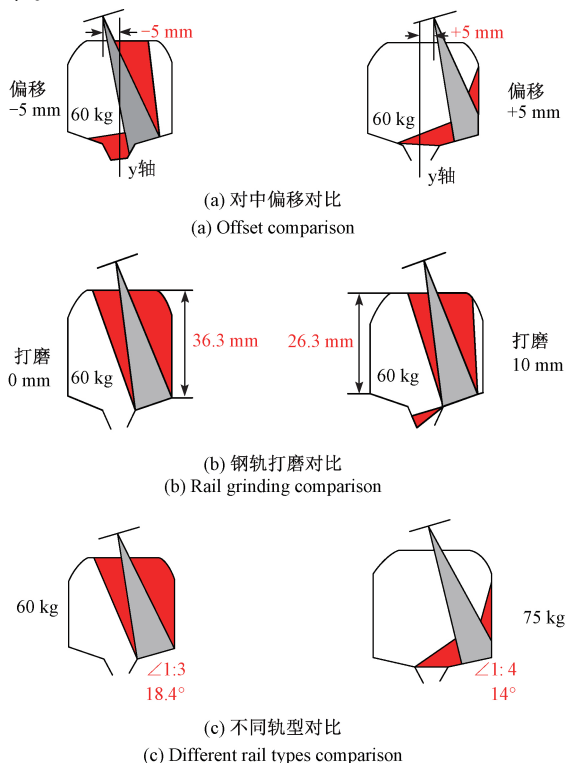


图 3 现有钢轨探伤车在不同对中偏移、轨面磨损和轨型下的超声覆盖

Fig.3 Ultrasonic coverage of the existing rail inspection car under different centering offsets, rail wear, and rail type

本系统的超声布局方案吸收现有钢轨探伤车超声布局优点(如 70°检测核伤效果最好;直打 70°可以检测轨头中间区域缺陷;倾斜 70°可以检测轨距角缺陷),重点解决以上存在的两个问题。采用优化布局方案:(1)使用直打 PA70°探头代替倾角 UT70°探头,PA70°探头晶片排列与钢轨横截面平行,检测不同钢轨或适应不同轨面状况时可以使用相控阵技术产生不同角度,达到最佳检测效果。(2)激发 PA70°探头同时产生 3 个不同的倾斜角度,倾斜角度选取原则是二次波反射点分别对应钢轨轨鄂下侧、中间、上侧位置,当探伤载体出现-5 mm,5 mm 对中偏移导致轨面的入射点和轨鄂的反射点位置发生变化后,保证仍然有至少一个倾斜角度可以覆盖到轨距角处^[15],如图 4 所示。

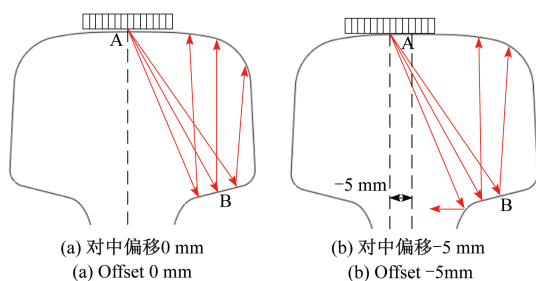


图 4 二次波轨距角波束覆盖

Fig.4 Second-wave gauge angle area beam coverage

2) 超声布局验证

根据重载铁路钢轨核伤出现位置分别在轨鄂和轨距角设计两类核伤缺陷,其中 D2、D3、D4 裂纹分布在轨鄂上、中、下侧;D1 核伤距轨面 8 mm-距轨侧 10 mm,D5 核伤距轨面 12 mm-距轨侧 10 mm,如图 5 所示。

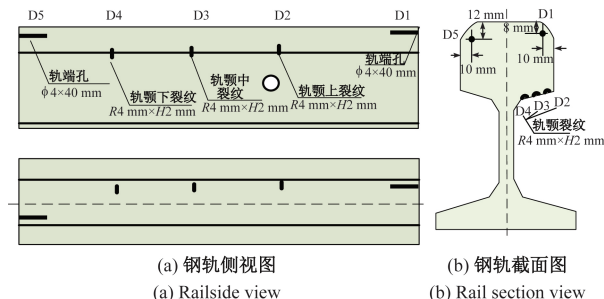


图 5 人工轨头核伤及轨鄂裂纹

Fig. Artificial TD and crack in the orbit of rail head

使用常规超声和相控阵超声技术检测 60 kg/m 轨和 75 kg/m 轨上人工核伤缺陷,其中 UT70°探头倾斜角度为 18°是固定值,无法改变;PA70°探头同时激发 3 个倾斜角度,二次反射波分别对应轨鄂下侧、中间、上侧位置。检测效果如表 1 所示。PA70°探头超声布局对在不同轨型上加工的缺陷均可以检出,信噪比超过 12 dB;对 PA70°探头人

工偏移 5 mm 再次进行检测,由于采用多倾角波束布局模式,提高了出现对中偏移后缺陷检出率,没有发生漏检。而 UT70°探头倾角固定、波束单一,因此对在不同轨型上加工的缺陷检测较难兼容,检测 75 kg/m 轨头核伤 D1 时信

噪比只有 9 dB,容易漏检;对 UT70°探头人工偏移 5 mm 再次进行检测,由于超声入射位置偏离轨面中心点 5 mm 而导致二次波在轨鄂反射点也发生偏移,造成 75 kg/m 轨头核伤 D1 和轨鄂下侧裂纹 D4 均无法检出。

表 1 轨头核伤和轨鄂裂纹检测结果
Table 1 TD and crack detection results

缺陷	检测方式	信噪比/dB		增益/dB		偏移 5 mm	
		60 kg/m 轨	75 kg/m 轨	60 kg/m 轨	75 kg/m 轨	60 kg/m 轨	75 kg/m 轨
轨颚上纹 (D2)	PA70°	16	16	33	34	Y	Y
	UT70°	20	16	36	38	Y	Y
轨颚中纹 (D3)	PA70°	16	15	32	34	Y	Y
	UT70°	16	17	33	34	Y	Y
轨颚下纹 (D4)	PA70°	20	15	34	34	Y	Y
	UT70°	15	14	40	42	Y	N
轨端孔 1 (D1)	PA70°	13	15	36	38	Y	Y
	UT70°	11	9	40	43	Y	N
轨端孔 2 (D5)	PA70°	12	15	36	38	Y	Y
	UT70°	15	13	40	44	Y	Y

由上可知,PA70°探头多波束及倾角可变超声布局可以满足不同轨型核伤检测,而 UT70°探头因为单波波束及固定倾角超声布局无法适应轨型变化、磨损、对中偏移情况下核伤检测,容易造成漏检。

2.2 高速检测方案及验证

1) 高速检测下脉冲重复频率理论计算

我国现有探伤车采用轮式探头进行探伤,超声波在探轮和钢轨内传播时,超声波声程由探轮声程 L_1 和钢轨声程 L_2 (一次波或二次波) 组成^[16],如图 6 所示。

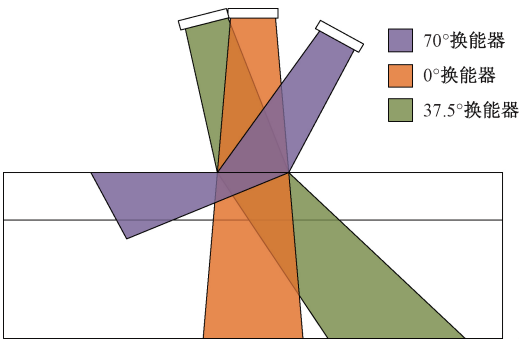


图 6 轮式结构声束传播示意图

Fig.6 Sound beam propagation of the wheel structure

以轮廓尺寸最大的 75 kg/m 轨计算超声飞行时间。37°超声通道和 70°超声二次波通道具有最大声程,飞行时间为 250 μ s,如表 2 所示。

表 2 轮式结构下超声飞行时间

Table 2 Ultrasonic flight time in wheel structure (μ s)

通道	轮内 L_1	钢轨内 L_2	总声程
0°	92	64.5	156.5
37°	100	150	250
70° (一次波)	78	100	178
70° (二次波)	78	173	250

为避免相邻两次超声波发射周期之间产生干扰,探轮内超声波连续发射时的最小发射间隔时间应大于 250 μ s。轮式超声探头在 6 mm 采样间隔下理论最大检测速度为 86.4 km/h。探轮内声程占探伤总声程近 2/5,严重浪费有效探伤时间、制约轮式探伤车提速,无法完全满足国内探伤车理想检测速度 80~100 km/h。

而采用皮带轮式的相控阵超声波高速钢轨探伤车直接与轨面接触,超声波只在钢轨内传播声程为 L_2 (一次波或二次波),如图 7 所示。

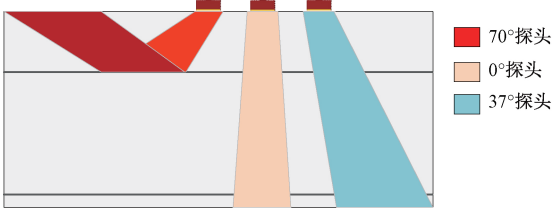


图 7 皮带式结构声束传播示意图

Fig.7 Sound beam propagation of the belt structure

70° 超声二次波通道具有最大声程, 飞行时间为 173 μs 。皮带式超声探头在 6 mm 采样间隔下理论最大检测速度为 124.8 km/h。如表 3 所示, 同等速度下探轮式采样间隔约为皮带式的 1.5 倍, 因此高速情况下探轮式探伤车比皮带式探伤车更容易漏检钢轨小伤损。

表 3 轮式和皮带轮式最大检测速度及不同速度对应采样间隔
Table 3 Maximum detection speed of wheeled and belt structure and corresponding sampling step

布局	6 mm 间隔最大 速度/(km/h)	不同速度/(km/h) 下的采样间隔/mm					
		10	30	50	70	80	90
轮式	86.4	0.69	2.08	3.47	4.86	5.55	6.25
皮带轮式	124.8	0.48	1.44	2.4	2.88	3.36	4.33

2) 不同采样间隔超声效果验证
为验证超声布局方案和高速下超声检测效果, 在车间建立实验平台。平台主要由检测小车、超声检测系统(皮带轮式)、人机交互系统、水电气控制系统和人工伤损钢轨线组成, 如图 8 所示。

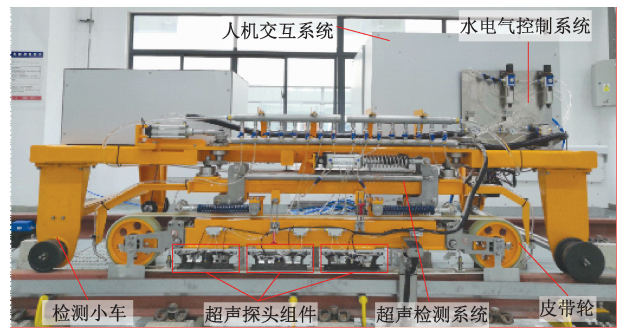


图 8 车间实验平台

Fig.8 The experimental platform in workshop

为模拟现场重载铁路钢轨伤损, 在车间铺设 75 kg/m 钢轨并在其上加工不同当量的轨头核伤、轨鄂裂纹、轨腰裂纹和轨底裂纹等典型人工伤损, 还原现场真实检测效果。通过将超声脉冲采样间隔分别设置为 1、4、6 mm 方式, 模拟探伤车在低速、中速、高速下超声检测效果, 每种采样间隔在伤损轨线路上重复测试 10 次, 最后统计平均检出率。

人工伤损检出率统计如图 9 所示, 除轨鄂裂纹在采样间隔 6 mm 时发生漏检(轨鄂裂纹只有 2 mm 深, 6 mm 采样报警点数不足导致漏检), 其余人工伤损检出率 100%。基于车间实验平台在不大于 6 mm 采样间隔下动态检测超声效果良好, 检测图谱如图 10~11 所示。说明基于皮带轮式的相控阵超声波高速钢轨探伤车可以实现钢轨区域全覆盖, 检测过程中无前后间隔脉冲超声波串扰而引起的幻影波产生, 满足 80 km/h 检测需求。

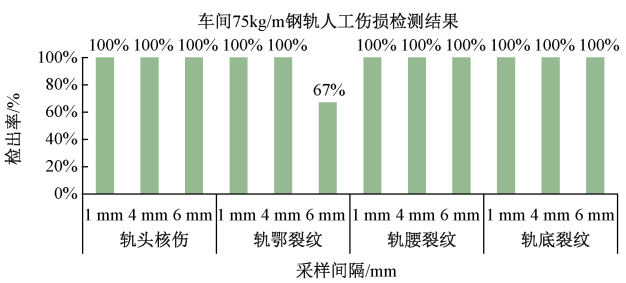


图 9 不同采样间隔人工伤损检出率

Fig.9 Detection rate of artificial defect at different sampling step



图 10 超声脉冲采样间隔 1 mm 时人工伤损检测图谱

Fig.10 Artificial defect detection B-scan at an ultrasonic pulse sampling step of 1 mm



图 11 超声脉冲采样间隔 6 mm 时人工伤损检测图谱

Fig.11 Artificial defect detection B-scan at an ultrasonic pulse sampling interval of 6 mm

2.3 智能判伤方案及验证

探伤车探伤时实时数据分析量大, 通过钢轨智能判伤系统可提高检测数据处理能力, 实现实时判伤现场复核; 又能准确预报伤损类型, 减少人为因素造成的误报、漏判和干扰点影响。

1) 判伤算法原理

智能判伤算法包括干扰点过滤和关联判伤两部分。干扰点过滤, 是基于干扰点都是离散出现, 默认只对连续两次触发的超声数据进行采集。关联判伤是基于不同通道对相同缺陷采集点空间校正后的相对关系保持不变, 利用关联通道条件预判对该区域检测到的缺陷进行二次确认, 降低误报率。关联通道可覆盖相同的钢轨区域^[17], 其判伤流程如图 12 所示。

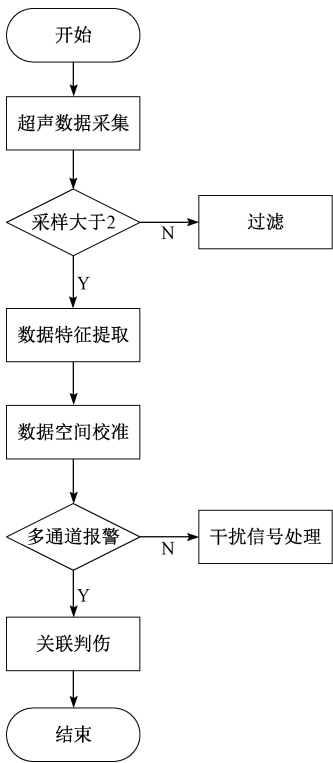


图 12 判伤算法流程

Fig.12 Flow chart of the defect detection algorithm

2) 算法实验验证

本钢轨探伤系统的数据处理模块已经应用在澳洲 SRMA 的探伤车上,在澳洲铁路 2 000 m 长测试线进行调试,其总计包含 5 种典型缺陷类型,缺陷总数为 32 个,在 60 km/h 速度下连续检测 10 次(受现场环境限制无法提速到 80 km/h 检测),验证算法对澳洲测试线上人工缺陷的平均检出率和误报率。澳洲测试线实验结果显示,缺陷可全部被超声检测出,且可被很好的识别,识别率达到 100%,误报率为 8.6%,如表 4 所示。

表 4 智能判伤算法验证结果

Table 4 Verification results of the intelligent defect detection algorithm

典型缺陷	缺陷当量	识别率	误报率
螺孔裂纹	4 mm	8/8	0/8
轨头横孔	$\phi 3$ mm	8/8	0/8
轨腰横通孔	$\phi 8$ mm	8/8	0/8
轨腰水平纵向裂纹	6 mm	8/8	0/8
非缺陷干扰点	/	/	3/35
汇总	/	100%	8.6%

注:8/8-分子代表缺陷正确识别数或误报数,分母代表缺陷总数。

误报原因主要是由于轮缘摩擦噪音以及超声信号干扰产生的干扰点会呈现在图谱上,如图 13 所示,其中黄色框内是系统自动识别的真实人工伤损;而红色框内是干扰噪声,但也被系统误判为人工伤损。为有效解决传统算法识别准确率受干扰点影响较大以及存在漏报的缺点,后续会利用大量伤损案例进行特征训练,排除非缺陷特征数据引起误判,实现对钢轨损伤的智能识别。

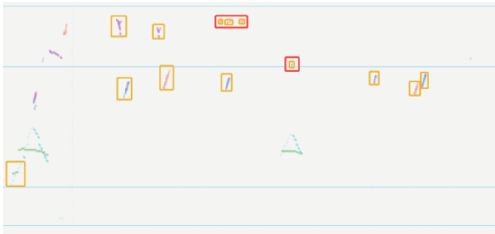
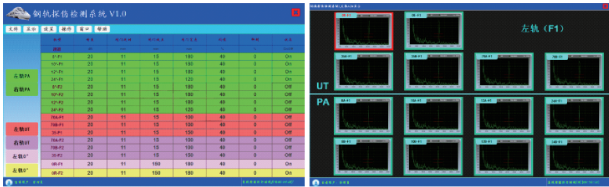


图 13 干扰噪声与人工伤损图谱

Fig.13 Noise and artificial detect displayed on B-scan

2.4 数据显示方案

钢轨探伤软件主要由参数配置、A 扫显示、B 扫显示 3 部分组成,如图 14~15 所示。参数设置界面可对超声系统各通道的增益、闸门延迟、闸门宽度、阈值、抑制和开关等进行配置;A 扫显示界面可根据检测需要,选择不同通道呈现在显示窗口上并实时调整增益和闸门等参数配置;B 扫显示主要负责系统自检、超声检测、数据存储、回放分析和数据传输等功能。



(a) 参数设置界面 (b) A 扫显示界面
(a) Parameter setting interface (b) A-scan display interface

图 14 超声参数配置与 A 扫显示界面

Fig.14 Ultrasound parameter configuration and A-scan display interface

钢轨探伤软件通过与轨面图像系统同步,可以对钢轨疑似缺陷区域实时轨面图像和超声探伤 A/B 扫进行关联显示,借助轨面图像可以排查超声探伤过程中由轨面状况不良而造成的干扰、噪声等情况,提高钢轨探伤对疑似缺陷分析,提高缺陷判伤准确性,如图 15 所示。

2.5 线路适应性方案及验证

高速钢轨探伤车运行过程中,线路及环境状态会对最终的检测结果造成严重影响,在高速检测时,线路碎弯、坑洼和曲率变化造成入射超声与轨面不垂直和探伤载体产生对中偏离,导致超声探头入射点位置和倾斜角

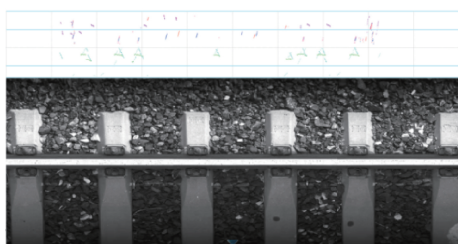


图 15 B 扫与轨面图像关联显示

Fig.15 B-scan and rail surface image correlation display

度偏离,A 扫显示监控底波失波,造成缺陷漏检;在北方冬季时间可长达半年,环境温度可低至 $-20^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$,低温下会加剧钢轨核伤发展,严重时还会引起钢轨脆断,所以必须加大线路探伤密度,而滑靴式钢轨探伤车检测过程中超声耦合用水量较大,耦合防冻加热不当不仅会造成缺陷漏检,严重还会导致设备被低温损坏。

1) 对中偏移

本系统的探伤载体具备自动伸缩轴功能,在线路正常的情况下,自动对中效果可满足 $\pm 5\text{ mm}$ 。探伤载体自带皮带轮前后各一组导轮,通过气动装置自动调整自动伸缩轴以确保导轮轮缘与钢轨内侧的保持贴合状态,实现实时机械对中。对于小半径弯道和钢轨磨损、肥边等造成的对中偏移情况,系统采用激光进行自动校正,如图 16 所示。探伤载体发生内侧偏移和外部偏移时,激光位移传感器与钢轨的距离值不同,根据激光传感器与钢轨距离判断探伤载体当前对中状态并进行修正^[18]。

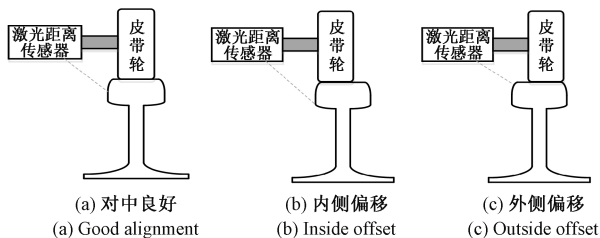


图 16 激光对中

Fig.16 Laser alignment

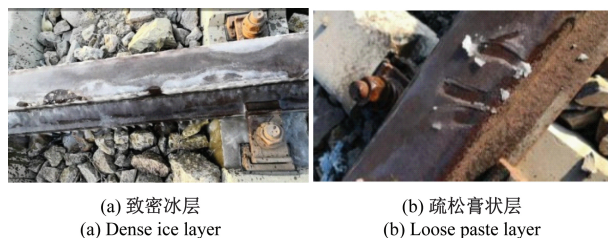
2) 耦合防冻

冬季低温探伤面临耦合水结冰问题^[19],包括皮带内耦合水和钢轨上耦合水的结冰。探伤载体紧贴钢轨高速运动,皮带相对钢轨是滚动摩擦,探头相对皮带是滑动摩擦。

由于空气比热容系数和导热系数小以及挡风板对高速冷空气的有效遮挡,空气与热水热交换速度慢;皮带内侧持续供给 50°C 热水可有效弥补能量损失。

轨面温度低、导热系数大及比热容大等特点,导致耦合水在钢轨上极易快速结冰,在钢轨表现形成致密冰层;防冻液冰点可达 -40°C ,以不同比例和水勾兑后的混合液

可有效降低冰点,可在钢轨上均匀铺展形成疏松膏状层具有良好的延展性且满足探伤耦合要求,如图 17 所示。

图 17 -20°C 下水和防冻液在钢轨表面形态Fig.17 Water and antifreeze on the surface of the rail at -20°C

因此冬季低温钢轨探伤时,探头和皮带之间使用热水进行耦合,皮带和探头之间形成热水耦合层(橘红色);轨面和皮带之间使用特点比例的防冻液进行填充,形成防冻液填充层(绿色),如图 18 所示。

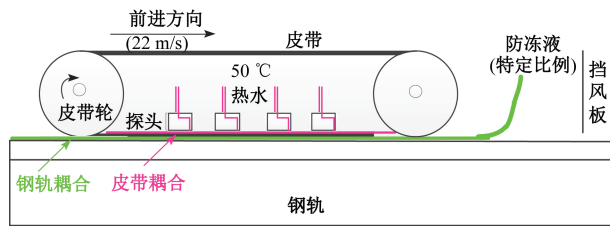


图 18 Trolley 小车探伤耦合层

Fig.18 Schematic diagram of Trolley flaw detection coupling layer

3 结 论

本文研究的高速钢轨探伤车,以瑞士 Speno 的自动伸缩轴式小车为系统安装载体,在高速运动过程中对中效果稳定,相控阵声束在轨头横向方向上以多声束交叉覆盖的方式也在一定程度上满足对中偏差的补偿,也为提高缺陷检出率创造了良好的前提。采用 PA+UT 的超声布局方案,对不同轨头廓形、不同轨头磨损的兼容性和适应性更强,满足重载线路的 60 kg/m 和 75 kg/m 的钢轨兼容性检测,尤其大大提高了轨头核伤的检出率。

引入快速相控阵技术,满足了高速探伤对超声激发速度的要求。采用 FPGA 技术实现数据处理的实时性和准确性。采用智能化缺陷识别算法提高了最终输出结果的准确性。采用直观化立体显示方式有效将超声探伤结果与机械视觉结果相结合,一定程度上弥补了表面伤损对超探影响造成的缺陷漏判。针对小半径曲线的适应性,采用激光伺服方式实现对中的自动调整,对于线路冬季低温,也针对性给出了防冻加热方案,确保检测作业的有效开展。

综上所述,本文研究的高速钢轨探伤系统与既有设

备相比,在轨头核伤检出率、自动对中有有效性、智能判伤准确性、检测结果直观化显示等方面有明显技术优势。

参考文献

- [1] 任松斌. 大型钢轨探伤车在朔黄铁路的运用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
REN S B. The Application of large scale rail flaw detection vehicle in the Shuohuang railway [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang railway university, 2017.
- [2] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1764-1780.
TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway defect non-destructive testing and monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1764-1780.
- [3] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 12-24.
ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 12-24.
- [4] 秦怀兵. 钢轨探伤车漏检伤损原因分析及对策研究[J]. 铁道建筑, 2016(12): 117-120.
QIN H B. Cause analysis and its countermeasure research of flaw missing detection by flaw detection car [J]. Railway Engineering, 2016(12): 117-120.
- [5] 徐其瑞, 刘峰. 钢轨探伤车技术发展与应用[J]. 中国铁路, 2011(7): 38-41.
XU Q R, LIU F. Development and application of rail flaw detection vehicle [J]. Chinese Railways, 2011(7): 38-41.
- [6] 张玉华, 许贵阳, 李培, 等. 钢轨探伤车自主化超声检测系统的关键技术[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(5): 131-136.
ZHANG Y H, XU G Y, LI P, et al. Key technology to autonomous ultrasonic detection system of rail flaw detection car[J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 131-136.
- [7] 马子骥, 董艳茹, 刘宏立, 等. 基于多线结构光视觉的钢轨波磨动态测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 189-197.
MA Z J, DONG Y R, LIU H L, et al. Dynamic measurement method of rail wave grinding based on multi-line structured light vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 189-197.
- [8] ZHANG H, JIN X, WU Q M J, et al. Automatic visual detection system of railway surface defects with curvature filter and improved gaussian mixture model [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(7): 1-16.
- [9] XAVIER H, PHILIPPE C. A unique and patented FAST UT Phased Array instrument[C]. NDE 2017 Conference & Exhibition of the Indian Society for NDT (ISNT), 2017: 1-8.
- [10] 黄筱妍, 石永生, 张玉华, 等. 超声波钢轨探伤车 B 显数据伤损模式分类技术研究 [J]. 中国铁路, 2018(3): 82-87.
HUANG X Y, SHI Y SH, ZHANG Y H, et al. BP neural network based on rail flaw classification of RFD car's B-scan data [J]. Chinese Railways, 2018(3): 82-87.
- [11] 门平, 董世运, 卢超, 等. 钢轨踏面低频超声表面波传播模式研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 13-20.
MEN P, DONG SH Y, LU CH, et al. Study on the propagation mode of low frequency ultrasonic surface wave on rail tread [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 13-20.
- [12] 石永生, 罗国伟, 徐其瑞. 钢轨探伤车对轨头核伤检测能力的分析[J]. 无损检测, 2014, 36(9): 34-37.
SHI Y SH, LUO G W, XU Q R. Analysis on transverse cracks detection capability of rail flaw detection vehicle [J]. NDT, 2014, 36(9): 34-37.
- [13] 石永生, 张全才, 李杰, 等. 探伤车与探伤仪的轨头核伤检测能力对比分析[J]. 铁路技术创新, 2012(1): 99-101.
SHI Y SH, ZHANG Q C, LI J, et al. Comparative analysis of rail head transverse defect detection ability between rail inspection flaw vehicle and flaw detector [J]. Railway technology innovation, 2012(1): 99-101.
- [14] 陆生. 75 kg/m 钢轨轨距角核伤漏检成因及对策 [J]. 中国铁路, 2015(11): 58-60.
LU SH. Causes and countermeasures of leak detection for 75 kg/m rail gauge [J]. Chinese Railways, 2015(11): 58-60.
- [15] 张俊岭, 王子成, 陈潇, 等. 基于相控阵的高速铁路钢

轨超声探伤检测系统[J]. 中国机械工程, 2019, 30(03):91-96.

ZHANG J L, WANG Z CH, CHEN X, et al. High-speed railway rail ultrasonic flaw detection system based on phased array[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30 (3):91-96.

- [16] 李培,王旭,石永生,等. 高速轮式钢轨探伤变距式超声波发射模式的设计与应用[J]. 铁道建筑, 2015(11):127-130.

LI P, WANG X, SHI Y SH, et al. Design-and-application of high speed wheel-type rail flaw detection device based on distance-variable and ultrasonic-emission mode[J]. Railway Engineering, 2015: 127-130.

- [17] 孙次锁,刘军,秦勇,等. 基于深度学习的钢轨伤损智能识别方法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(5):53-59.
SUN C S, LIU J, QIN Y, et al. Intelligent detection method for rail flaw based on deep learning[J]. China Railway Science, 2018, 39(5):53-59.

- [18] 钟艳春. 钢轨探伤车激光自动对中系统研制[J]. 铁道建筑, 2016(10):121-124.

ZHONG Y CH. Research and manufacture of laser automatic alignment system for rail flaw detection car[J]. Railway Engineering, 2016(10):121-124.

- [19] 苏华城. GTC-80 钢轨探伤车耦合水系统研究与改进[J]. 铁道运营技术, 2017, 23(4):46-49.

SU H CH. Research and improvement of coupling water system for GTC-80 rail inspection vehicle[J]. Railway Operation Technology, 2017, 23(4):46-49.

作者简介



E-mail: 10572986@shenhua.cc

Lan Xiaofeng received his B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Southwest Jiaotong University in 1994 and 1997, respectively. He is currently a senior engineer at Zhuneng Group Dazhun Railway Company, Inner Mongolia China. His main research interests include heavy haul railway track transportation and maintenance.



张渝 (通信作者), 1999 年、2002 年、2017 年于西南交通大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为西南交通大学物理科学与技术学院教授,主要研究方向为传统超声及相控阵超声检测技术,智能图像处理技术,基于传感器网络的专家诊断分析及评估。

E-mail: zhang.yuer@163.com

Zhang Yu (Corresponding author) received her B.Sc. degree, M.Sc. degree and Ph.D. degree all from Southwest Jiaotong University in 1999, 2002 and 2017, respectively. She is currently an associate professor in the School of Physical Science and Technology at Southwest Jiaotong University. Her main research interests include non-destructive testing technology, intelligent image processing technology, expert diagnosis analysis and evaluation based on sensor network.