

铁路钢轨断轨检查技术应用研究

王 栋

中国铁路太原局集团有限公司 山西 太原 030000

摘 要: 钢轨是轨道交通运输系统的重要组成部分,具有引导机车车辆车轮前进,同时承受车轮荷载并将其传递至轨枕上的功能。铁路运营线上如果出现钢轨断裂就有可能造成列车脱轨、倾覆等重大行车事故,造成人员伤亡和巨额财产损失。因此,分析和研究铁路钢轨断轨检查技术,对保障铁路运输安全、实现我国铁路部门制定的“三防”措施中的防断轨要求具有重要意义。

关键词: 铁路; 钢轨断轨; 技术应用

1 研究背景、意义

大秦线是我国主要的货运重载铁路,其显著特点是以煤运为主、行车密度大、重车运行速度快、线路污染严重、线路环境复杂,保障安全和运营维护的经济性,是铁路建设和运营管理的重要课题。道岔尖轨和心轨是可动部件,尖轨和心轨折断后仅在牵引点处利用道岔转换设备锁闭而无扣件扣压,从而处于自由状态,尖轨折断极易导致列车脱轨事故。



图1 铁路道岔钢轨折断

现有道岔断轨检测设备分为两种,一种为离线检测设备,如传统超声以及涡流探伤。另外一种为在线实时监测设备,主要基于导波以及被动声发射原理。

传统超声探伤可对轨头和轨腰内部进行检测,但轨底是盲区,根据统计来看道岔断裂大多是从轨底裂缝萌生开始。涡流探伤设备对轨底表面及近表面的伤损有较高检测能力,但滑床板位置的尖轨轨底无法检测。离线检测设备除了存在盲区外,受探测时间以及人员的影响较大^[1]。

基于导波的钢轨实时在线监测原理是通过在钢轨安装换能器激励钢轨产生导波信号,导波信号沿钢轨长度方向传播,当钢轨断裂时,断裂处界面不连续,大部分导波能量发生了反射,仅有很少一部分能量继续沿钢轨传播,因此通过在钢轨另一端安装接收传感器,通过检

测接收到该导波的能量幅值,判断是否发生断轨。

2 声波信号在钢轨中传播特性研究

为探究声信号在直尖轨断轨与健康状态下传播特性,以客专18号道岔为例,基于有限元原理,建立道岔转辙器区三维分析模型,模型中考虑影响尖轨中声信号传递特性的主要结构部件,如尖轨、基本轨、铁垫板、轨下垫板等^[2]。

仿真条件:

- 1不同位置断轨:尖轨跟端和尖端;
- 2不同条件仿真:尖轨和基本轨密贴和斥离。

仿真数据结论:不同激励频率下,折断前后振动信号幅值相差两个数量级以上,频谱产生明显变化,能作为钢轨断轨探测评价指标。

3 系统结构研究

经前期论证,道岔尖轨断轨检查采用声学检测的原理。声波在钢轨中传播时如果遇到大缺陷或者钢轨完全折断,会导致声波时频特征变化,通过检测传播过程中声波特征的变化,可以判断是否有断轨发生。通过软件算法处理,可以识别过车等强噪声信号,避免因过车等场景发生误报。

基于声波的道岔尖轨断轨检查系统,在尖轨跟端施加特定频率的声波信号,在尖轨跟端接收该声波信号,通过计算接收端信号的时频特征来判断钢轨是否发生折断。

系统由发送器、接收器、通信模块、供电模块、换能器、声波采集器及显示终端构成。其中发送器、接收器、通信模块安装在轨旁机柜内,供电接口为220V交流电,换能器与声波采集器通过卡具安装在尖轨跟端。系统各部分功能如下:

发送器:产生特定频率及电压的电信号驱动安装在钢轨上的换能器;

接收器:处理声波采集器发来的信号,将处理结果

发送至通信模块；

通信模块：通过NB-LoT物联网平台将钢轨状态信息及系统自检信息发送至显示终端；

供电模块：对发送器、接收器、通信模块进行供电；

换能器：接收发送器产生的电信号，进行电-声信号

的转换，将声波耦合在钢轨上；

声波采集器：采集钢轨上的声波信号并转换为电信号，将电信号发送至接收器；

显示终端：显示钢轨状态信息，具备报警功能，可及时通知相关人员。

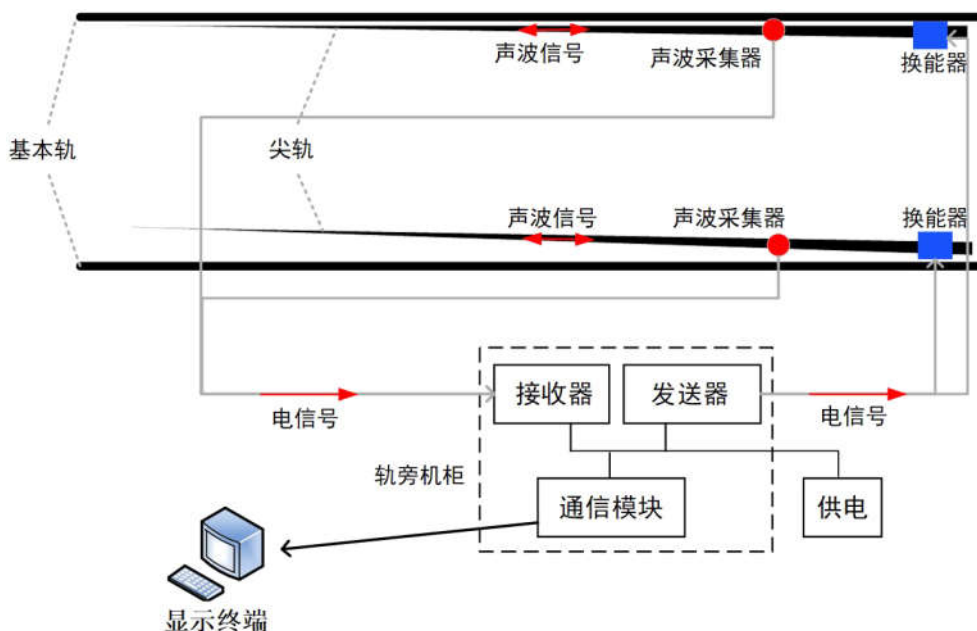


图2 道岔钢轨折断监测系统

4 研究方法

采用理论分析、数值仿真、实验室短距离钢轨试验、道岔钢轨试验相结合的研究思路。首先建立钢轨有限元模型，结合数值方法求解不同频率的超声导波在钢轨中的传播特性，探讨不同模式下的振型、相速度与群速度，进一步通过数值仿真研究钢轨中由于焊缝、轨头踏面磨损、雨雪覆盖、温度等因素对声波传播的影响规律。在此基础上选优频散小、衰减小、对钢轨损伤敏感的导波模式作为最优传播模式。由于钢轨机械阻抗对换能器性能有影响，需要将换能器与钢轨进行耦合建模，确定发射换能器在钢轨中的安装位置、安装方向以及施加何种类型激励信号。并在实验室条件下及现场进行换能器性能的测试，使换能器与钢轨的耦合效果达到最优。为了对断轨具体位置进行定位，接收换能器需要对长距离微弱信号回波信号进行检测，实现从相干或频率成分相近的接收信号中提取出损伤回波信号。最后为整个硬件系统以及软件功能的设计，包括发射-接收单元设计、信号编码方式、轨旁通信与电源等设备、消除环境噪声以及电磁干扰单元等^[1]。

5 研究关键点

5.1 复杂不规则截面下声波传播特性及模式研究。钢

轨中导波的传播模式可通过波数频率关系和对应的结构形变来有效识别。应用半解析有限元法，基于虚功原理构建导波在任意截面弹性导波中传播的控制方程，求解弹性波中导波的频散曲线和结构形变。对0-50kHz范围内自由状态下钢轨中的导波传播基本模式进行分析，再使用模态力锤在轨头激励，多个振动加速度传感器测量钢轨横截面变形响应的方法给出钢轨中垂直于横向振动模态导波的波数频散曲线。

5.2 基于多物理场耦合的夹心式压电换能器优化设计。针对传统解析法在压电换能器设计中存在适用范围窄、计算繁琐以及结果不精确等缺点，提出基于Comsol的换能器优化设计。为得到夹心式压电换能器的初步尺寸，基于一维细棒振动和Mason等效电路理论得到了换能器频率方程和前后振速比公式；结合实际工况选定材料后利用1stOpt对前盖板的隐函数进行求解，设计了换能器的结构参数；基于Comsol Multiphysics压电耦合模块对设计的换能器进行动力学仿真研究，得到了换能器的特征频率、相应振型以及正反谐振频率、基频频率和最高电导值，从而获得了换能器的节面高度、品质因数以及动态电阻等参数。再利用Comsol优化模块对前后盖板尺寸进行修正。

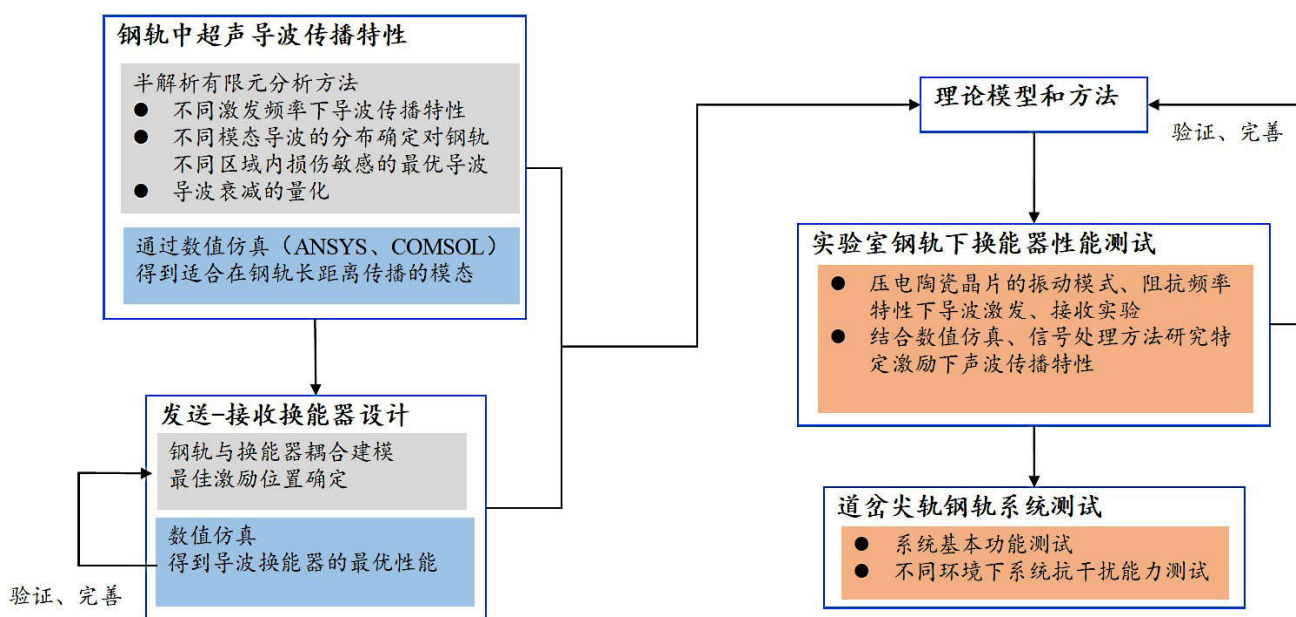


图3 研究方法

5.3 声波激励-接收理论模型及方案设计。通过半解析有限元的方法,求解得到钢轨中的频散曲线,并建立有限元模型研究不同激发频率下钢轨导波的传播特性,实现模式导波的振型分析。使用不同频率、不同幅值以及不同周期的窄带信号作为激励源,在钢轨的不同位置进行激励响应分析,得到钢轨的传播特性,同时结合实验得到不同钢轨、不同激励位置下的最优激励参数,包括最佳激励位置、最佳频率点并建立数据库。根据实际需求得到适合于轨头、轨腰、轨底的声波激发-接收方案,以满足对不同损伤位置检测的现场实际需求。

5.4 基于不同频率信号相关性分析的回波特征提取算法研究。通过对回波时、频域及经验模式分解信号的时频分析方法,提高了信号分辨率,为回波信号特征提取拓展了空间。引入故障诊断的特征有效性评价理论,对高维的信号参数进行了特征有效性评价,剔除无效的信号参数,得到一个维数较低的有效回波信号特征集合。利用特征选择理论的穷举搜索策略,几何距离度量与信息度量评价准则,并通过支持向量机分类器的分类验证,得到了道岔钢轨不同缺陷大小下回波值,实现缺陷分类与量化。

5.5 结合大秦线复杂环境,本项目采用全天候在线实时智能监测无人值守运行方式,对道岔钢轨进行实时及多维监测,提升铁路运输的安全性及稳定性。

6 创新点

6.1 首次提出了基于主动声波法的岔区钢轨断轨监测方法,实现了岔区钢轨断轨全天候在线实时监测,并

形成了成套系统装备,可对钢轨健康状态进行实时监测,为智能调度、自动驾驶、智能运维提供基础泛在感知系统;

6.2 分析影响声波在钢轨中传播的因素,针对雨雪、温度等环境波动,创新性的提出基于小波及主成分分析的主动声波信号处理算法,解决了系统随环境因素变化时信号波动较大问题,提高系统稳定性和检测准确率,实现了道岔钢轨伤损检测向监测的升级。

6.3 首次采用主动型声波的技术手段进行钢轨断轨监测,采用有限元方法建立了钢轨模型并通过实验验证,结合小波方法和瑞利-兰姆方程分析了导波的特征,对识别钢轨较早期裂纹提供重要支撑作用。

6.4 针对道岔区域异形截面,创新性地设计出一种对钢轨伤损敏感的导波模式,并通过仿真与试验相结合的方式研究压电换能器参数,包括陶瓷片厚度、振动模式、数量,前后盖板结构、尺寸及材料,螺栓预紧力等对其振动特性的影响,设计出可以激励出这种导波模式的换能器。

6.5 首次实现了一种基于一维局部二元模式算法结合核主成分分析提取钢轨缺陷回波信号特征的方法。采用一维局部二元模式的算法提取缺陷回波信号的特征,通过核主成分分析对此特征集进行主成分分析,选取贡献率之和超过90%的前N个主成分作为缺陷分类的特征向量,利用基于径向基核函数的支持向量机实现了缺陷严重等级的自动分类,为道岔钢轨缺陷分类及无损评价提供了重要参考。

结束语

铁路钢轨断轨检查技术的研究和应用,对于保障铁路运输安全、提高运营效率具有重要意义。铁路钢轨断轨检查技术的研究和应用是一项复杂而重要的工作,需要不断地改进和完善。通过本文的研究,我们可以看到未来在钢轨断轨监测方面的巨大潜力和广阔前景。

参考文献

[1]赵振国,李陆章,王良玉.铁路钢轨断轨故障检测技术

综述[J].铁道学报,2019,36(8):1-7.

[2]李海亮,高兵,王勇.基于机器视觉的铁路钢轨断轨检测技术研究[J].中国安全科学学报,2018,26(1):15-20

[3]张志扬,张亮,董洋等.钢轨断轨的红外热信息检测技术研究[J].信息学报,2019,40(1):197-204.

[4]王军,吴国保,朱月.铁路钢轨断轨预警技术研究综述[J].铁道通信与信号工程,2018,60(4):121-132.