

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.06.004

超声导波钢轨断裂监测系统 设计及应用

周永久¹, 何继平¹, 董恒权¹, 王平², 宋天朗², 冯家声³

(1. 苏州市轨道交通集团有限公司, 江苏苏州 215100; 2. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106;
3. 重庆泰梦德科技有限公司, 重庆 400072)

摘要: 为实时监测钢轨健康状态, 实现对钢轨断裂损伤的早期预警, 提出一种结合超声导波检测技术和变分模态分解信号处理技术的断轨检测方法。针对钢轨断裂检测需求, 进行系统工作流程以及各模块硬件电路的设计与搭建; 并在有限元仿真软件中建立钢轨三维模型, 探究超声导波在钢轨中的传播速度与信号降噪方法的可行性。在苏州地铁5号线进行设备安装测试, 通过人工模拟断轨缺陷的方法验证断轨监测系统的有效性, 检测结果表明: 钢轨出现断裂情况时, 系统远程报警时间为3 min, 缺陷定位误差率为1.1%, 为钢轨断裂监测提供有效手段。

关键词: 城市轨道交通; 超声导波; 断轨检测; 变分模态分解

中图分类号: U231; U216.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)06-0027-08

Design and Application of Ultrasonic Guided Wave Rail Fracture Monitoring System

ZHOU Yongjiu¹, HE Jiping¹, DONG Hengquan¹, WANG Ping², SONG Tianlang², FENG Jiasheng³

(1. Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215100; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106; 3. Chongqing Taimengde Technology Co., Ltd., Chongqing 400072)

Abstract: To monitor rail health in real-time and provide early warning of rail fracture damage, this study proposes a broken rail detection method that combines ultrasonic guided wave detection and variational mode decomposition signal processing technologies. The system workflow and hardware circuits of each module were designed and constructed according to the requirements for rail fracture detection. A three-dimensional rail model was created using finite element simulation software to analyze the propagation speed of ultrasonic guided waves within the rail and assess the feasibility of the noise reduction technique. The system's effectiveness was verified through equipment installation tests on Suzhou Metro Line 5, where artificially simulated rail fractures were used. The results demonstrated that, upon rail fracture, the system achieved a remote alarm time of 3 minutes and the defective positioning error is 1.1%, providing a reliable approach for rail fracture monitoring.

Keywords: urban rail transit; ultrasonic guided wave; broken rail detection; variational mode decomposition

城市轨道交通作为居民的主要出行方式之一, 承担着城市运行的重要角色, 为保证地铁列车的安全运营, 需定期检查轨道的完整性和安全性。

目前国内采用无损探伤技术作为检测手段, 保证钢轨服役期间的安全性, 其能够在不改变被检对象物理状态的情况下, 检测钢轨近表面缺陷与内部缺

收稿日期: 2024-03-22 修回日期: 2024-06-05

第一作者: 周永久, 男, 本科, 工程师, 主要从事轨道交通维修技术管理, zhouyongjiu@sz-mtr.com

基金项目: 江苏省重点研发计划(BE2021621); 江苏省工业和信息化产业转型升级专项资金项目(苏工信综合[2022]115号)

引用格式: 周永久, 何继平, 董恒权, 等. 超声导波钢轨断裂监测系统设计与应用[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(6): 27-34.

ZHOU Yongjiu, HE Jiping, DONG Hengquan, et al. Design and application of ultrasonic guided wave rail fracture monitoring system[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(6): 27-34.

陷^[1-2], 具有检测效率高、适用范围广等特点。地铁工作人员常采用手持式超声检测设备对钢轨线路进行巡检, 但因线路检测区间距离较长, 检测过程只能在空窗期进行, 检测效率低。为解决以上问题, 本文引入超声导波检测技术, 该技术能够自动检测钢轨健康状态, 当出现断轨情况时, 实现缺陷精确定位分析。

超声导波检测技术作为一种新兴检测手段, 利用声波的传播特性, 检测钢轨的内部情况^[3-4], 具有检测距离远、能量集中等特点, 早期常用于检测管道、钢材等对象。相比于其他检测技术, 超声导波检测技术具有实时性好、灵敏度高等特点。任远^[5]将超声导波检测技术运用于钢轨断裂检测, 为超声导波技术检测钢轨提供了理论依据。

轨道环境中存在多种噪声, 如电气设备导致的电噪声, 列车车轮与钢轨接触时因冲击产生的轮轨噪声等, 这些噪声对导波信号产生干扰, 使得断轨缺陷识别的难度增大, 为了解决这些问题, 需要研究合适的去噪算法对超声导波信号进行预处理。变分模态分解算法由 DRAGOMIRETSKIY 等^[6]提出, 该算法是基于被分解信号频率信息的变分分析算法, 主要以维纳滤波和希尔伯特变换等数学理论为基础^[7]。

本文通过构建钢轨断裂监测系统, 采用超声导波检测技术监测地铁无缝线路钢轨健康情况, 为提高一次检测效率及灵敏度, 引入变分模态分解方法对导波检测信号进行处理, 全天候实时在线监测钢轨, 保障钢轨服役期间的安全。

1 超声导波断轨监测系统

1.1 超声导波检测方法

超声导波是一种在波导中传播的机械波, 波导是指几何尺寸不是无限大的传播介质, 常见的波导有平板、棒、管道、钢轨等。当超声波在这类有界介质中传播时, 会与介质的边界发生碰撞进而不断反射, 最终形成沿介质长度方向传播的超声导波^[8]。目前采用的钢轨检测方法为: 反射波法和透射波法。

1) 反射波法。超声导波在钢轨中传播时, 遇到缺陷将产生反射与衰减, 通过分析回波信号的特征, 能够得到回波传播的时间, 结合超声导波传播的速度, 可以分析缺陷出现的位置^[9-10]。反射波法的检测原理如图 1 所示, 本系统主要通过反射法判断钢轨健康状况, 通过分析回波信号, 能够对缺陷定位定量分析。

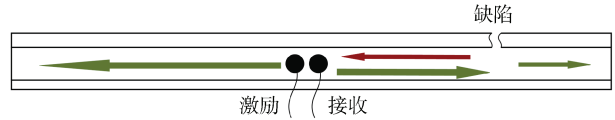


图 1 反射波法

Figure 1 Reflected-wave method

2) 透射波法。透射波法主要是分析直达波的衰减, 判断钢轨是否发生断裂, 超声导波在健康状态下的钢轨与存在断轨情况的钢轨中传播, 衰减情况不同^[11], 通过信号做差对比, 能够得出钢轨内部结构情况。透射波法的检测原理如图 2 所示。透射波法检测灵敏度低, 不适用于长距离断轨检测。

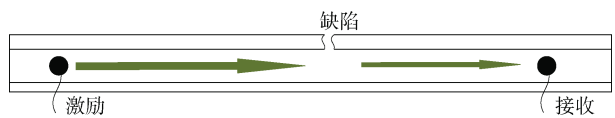


图 2 透射波法

Figure 2 Transmittedwave method

1.2 超声导波监测系统

监测系统由硬件检测设备与软件监控平台构成, 硬件检测设备由超声换能器、硬件电路、无线通信模块等组成, 如图 3 所示。现场设备安装情况如图 4 所示。

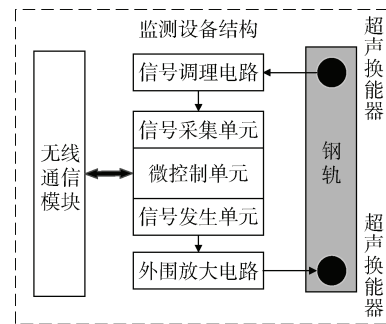


图 3 超声导波监测硬件系统

Figure 3 Ultrasonic guided wave monitoring hardware system



图 4 现场设备安装

Figure 4 Field equipment installation

控制模块(微控制单元)是监测系统的核心部分, 实现信号产生、接收与上传等功能, 为保证高效监测, 本系统采用 STM32F429 芯片作为主控芯片, 通过信号

发生单元外设生成激励波形, 信号采集单元外设采集导波信号, 利用串口连接无线通信模块实现和软件平台的通信。

监测设备安装在轨道现场, 软件平台部署在服务器上, 二者之间需要使用无线通信技术实现通信。苏州轨道交通已实现全线网 4G 网络覆盖, 因此本系统选择 4G 数据传输单元(data transfer unit, DTU), 保证数据交互的稳定性, 利用单片机的串口连接, 实现远程数据传输。

信号调理电路负责处理和采集超声换能器接收到的导波信号, 由信号放大电路与信号滤波电路组成, 对信噪比低的超声导波信号进行预处理, 放大电路采用的芯片为亚德诺公司生产的 AD620 芯片。

软件平台负责指令下发、数据的监控与处理, 当监测线路出现断轨情况时, 向相关人员发出断轨预警信息, 软件平台结构如图 5 所示。

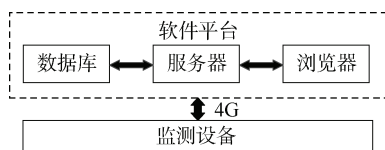
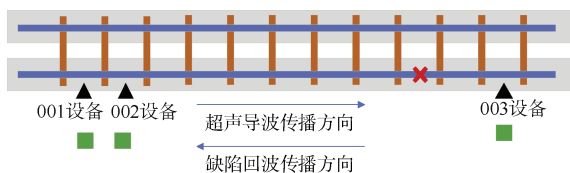


图 5 超声导波断轨监测软件平台结构

Figure 5 Software platform structure of ultrasonic guided wave broken-track monitoring

超声导波断轨监测系统相比于传统的检测设备, 具有全天候在线监测、一次检测距离为 1 km、检测灵敏度高特点, 设备部署方式如图 6 所示, 图中 001 设备为激励设备, 002 设备和 003 设备为接收设备, 分别用于采集反射波信号与直达波信号, 由于钢轨区间长达上百千米, 为提高检测效率, 通过设定激励时间间隔和接收上传方式, 将全路段分成多个区域, 采集钢轨中的超声导波信号, 实现长距离高效检测。



注: ×表示断轨位置; ■表示系统电箱安装位置; ▲表示超声换能器安装位置

图 6 设备部署方式

Figure 6 Device deployment mode

上位机接收到超声导波信号数据夹杂大量噪声干扰, 如图 7 所示, 其中主要成分包括电气设备带来的

电噪声, 列车运行的振动噪声及环境变化引起的环境噪声等。为降低系统误报率, 提高检测灵敏度, 需采用滤波方法对检测信号进行预处理, 常用的滤波方法如小波变化(DWT)、经验模态分解(EMD)等滤波效果并不明显^[12], 因此引入变分模态分解方法(VMD)对超声导波信号进行分解重构, 滤除信号中的干扰噪声, 提高缺陷检出率。

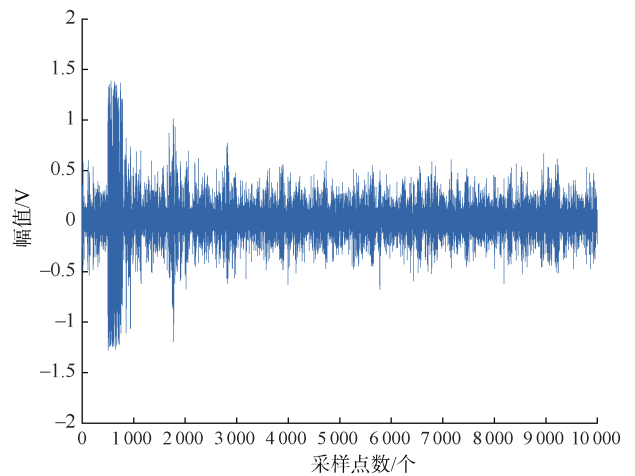


图 7 含噪信号

Figure 7 Noise signal

1.3 变分模态分解

变分模态分解方法(VMD)是一种信号处理技术, 通过将原始信号分解为多个模态分量, 并查找模型中的最佳解, 确认每个模态分量的中心频率和带宽, 从而有效实现信号在频域上的分离, 具体实现过程如图 8 所示。

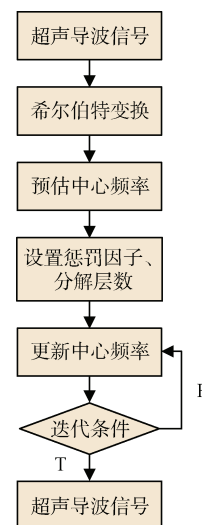


图 8 VMD 算法流程

Figure 8 VMD algorithm flow

区分出的所有模态分量之和等于原始信号，模态分量函数(IMF)的表达式^[12]如下：

$$u_k(t) = A_k(t) \cos[\phi_k(t)] \quad (1)$$

式中， $A_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时幅值； $\phi_k(t)$ 为信号 $u_k(t)$ 的瞬时相位； k 为模态数量。

1.4 去噪算法验证

本次研究首先采有限元仿真实验，验证算法的可行性。图 9 为采用 COMSOL 仿真软件搭建的 CHN60 型号钢轨模型。

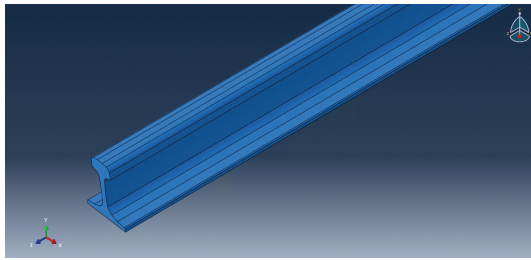


图 9 钢轨有限元模型
Figure 9 Finite element model of the rail

为了更好地验证超声导波检测方法的可行性，通过轨腰激励的方式，研究仿真情况下超声导波在钢轨中的传播过程及信号特征，传播云图如图 10 所示。超声导波在直轨中的传播速度为 3 228 m/s，为缺陷定位提供参数。

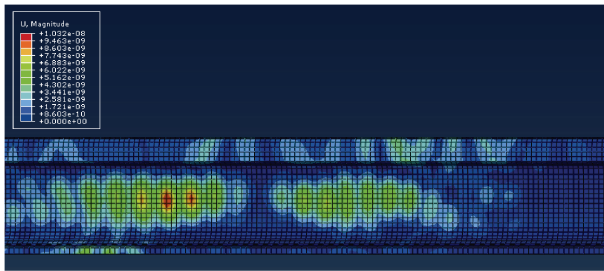


图 10 超声导波传播云图
Figure 10 Ultrasonic guided wave propagation cloud

超声导波监测系统受干扰影响较大，外界噪声会导致系统误报、漏报等情况，通过在仿真信号中叠加噪声的方式模拟真实信号，使用 EMD 和 VMD 算法对信号去噪，原始信号和叠加噪声后的信号如图 11 所示。

EMD 算法的分解结果如图 12 所示，IMF2 为有用分量，通过分析可知，EMD 算法能从噪声中分解出有用信号，但对于噪声信号的分解不够彻底，出现了很多的虚假分量。

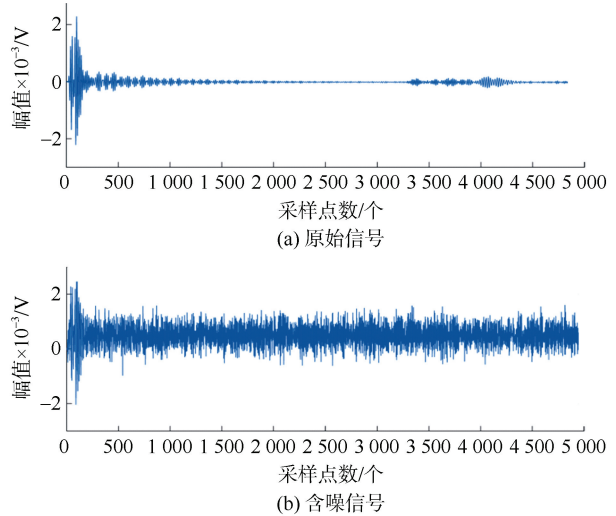


图 11 原始信号和含噪信号
Figure 11 Raw signal and noisy signal

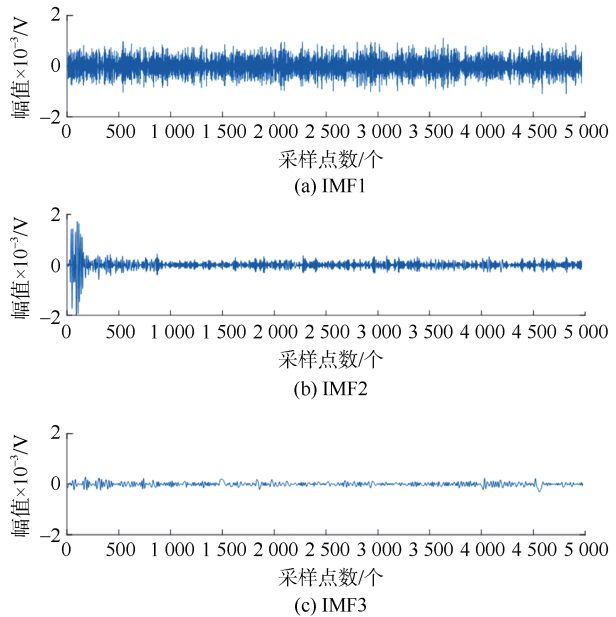
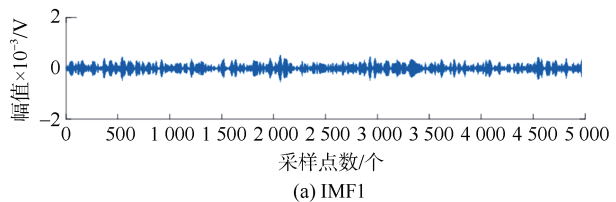


图 12 EMD 算法处理结果
Figure 12 EMD algorithm processing results

设置 VMD 的分解层数 $K=3$ ，惩罚因子 $a=2\ 000$ 。结果如图 13 所示。IMF1 和 IMF3 为噪声分量，IMF2 为有用信号。可以看出 VMD 算法能够有效分解出噪声成分，并且在很大程度上保留了原始信号。



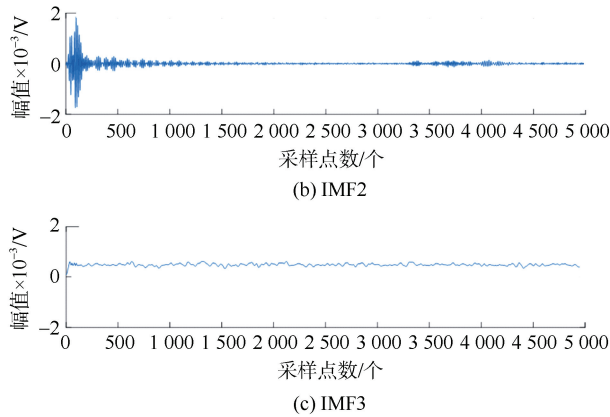


图 13 VMD 算法处理结果

Figure 13 Processing results of the VMD algorithm

2 苏州地铁 5 号线实验验证

实验平台由电源、超声换能器、硬件电路板、通信模块等组成，其中超声换能器使用固定装置安装在钢轨上，通过信号线接入电路板的激励和接收端口，测试平台如图 14 所示。实际实验安装位置为苏州地铁 5 号线阳澄湖南站下行区间。

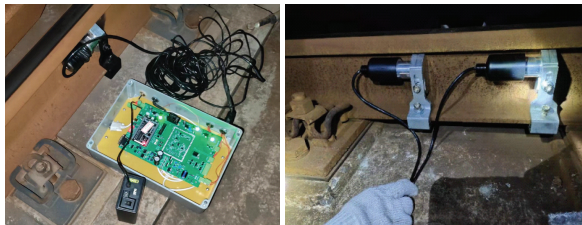


图 14 测试平台搭建

Figure 14 Test platform construction

2.1 轨道线型实验

无缝轨道线路存在弯道区间，为验证超声导波断轨监测系统的检测距离是否受轨道线型影响，进行同距离下对比实验，实验对象为 700 m 的直轨区间与全长 700 m、半径 390 m 的弯道区间，弯道区间参数如图 15 所示。分别在两种实验条件下进行直达波衰减距离实验，信号对比如图 16 所示，700 m 直轨区间直达



图 15 弯道区间参数

Figure 15 Curve section

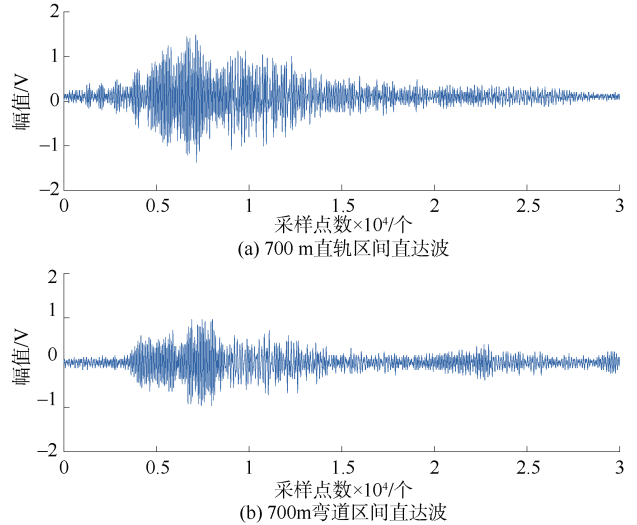


图 16 直达波信号时域对比

Figure 16 Time-domain comparison of direct wave signals

波信号最大值为 1.487 4 V，信号平均能量为 0.103 3 V；700 m 弯道区间直达波信号最大值为 0.964 8 V，信号平均能量为 0.045 4 V。经过对比可得，相同距离下，超声导波检测在直轨区间能量更强，检测距离更远，在弯道区间安装监测设备时，需根据检测情况缩短一次检测距离，提高检测精度。

2.2 安装实验及监测系统运行情况

超声导波断轨监测平台如图 17 所示，监测系统包括信息管理模块、数据存储模块及路段健康监测模块。信息管理模块包括报警信息、损伤位置与损伤大小等信息；数据存储模块可以根据需求选取不同类型数据库；路段健康监测模块通过设备号区分各区域检测信号及钢轨健康状况。



图 17 监控中心页面

Figure 17 Monitoring center page

苏州地铁 5 号线阳澄湖南站上行与下行区间安装超声导波断轨监测系统，安装情况如图 18 所示。

根据现场安装情况，超声导波钢轨断裂监测系统安装方式符合苏州城市轨道交通安装要求。在苏州



图 18 安装情况

Figure 18 Installation condition

地铁 5 号线正常运营的情况下, 导出近 30 d 的监测数据进行统计分析, 数据样本共 12 530 组, 将钢轨状态分为 3 种: 断轨、空闲、占用, 将数据进行分类可以得到柱状图如图 19 所示, 安装区间未出现断轨情况, 钢轨状况良好, 系统运行正常。

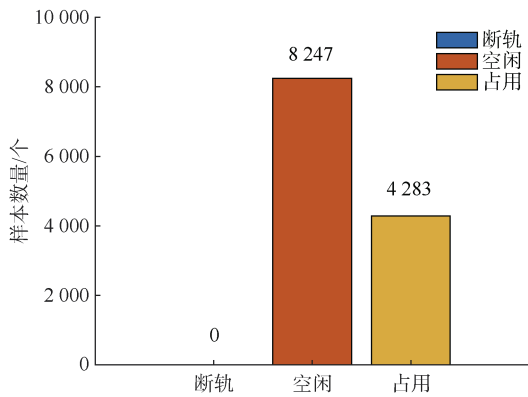


图 19 监测系统运行情况

Figure 19 Monitoring system operation

本实验对超声导波监测设备的硬件部分进行测试, 在验证监测设备各模块功能正常的基础上, 对监测系统整体功能进行可靠性测试, 实验结果证明超声导波断轨监测系统能够高效监测钢轨健康状况。

2.3 断轨实验

由于实际断轨故障发生概率太小, 本次实验采用了钢轨锯轨实验验证断裂监测系统有效性, 检测时间间隔为 3 min, 实验对象为试验区间内长度为 300 m 的无缝钢轨, 锯轨位置距离设备 180 m, 锯轨深度为钢轨高度的 30%, 锯轨位置为直轨轨头处, 锯轨示意如图 20 所示, 分别采集锯轨前后的导波信号, 根据脉冲回波法验证超声导波检测方法的有效性与监测系统的灵敏度。

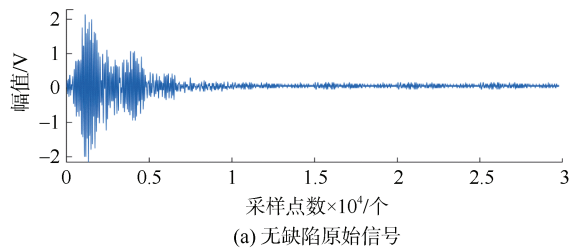
图 21 为服务器存储的钢轨完整状态和断轨状态下的原始信号数据, 从信号时域图中可以发现, 缺陷回波信号受外界噪声干扰, 难以实现断轨定位分析, 故采用变分模态分解方法进行信号去噪处理, 经信

号处理后的信号时域如图 22 所示, 图中缺陷回波信号明显。

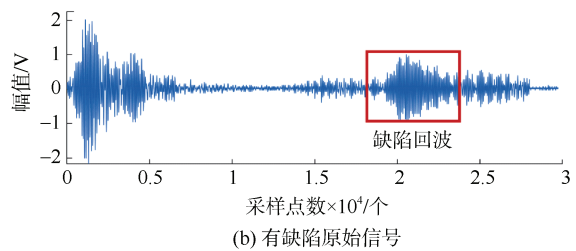


图 20 实验对象与 30% 锯轨示意

Figure 20 Experimental object and 30% saw rail



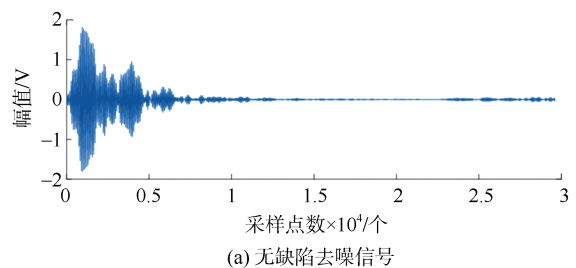
(a) 无缺陷原始信号



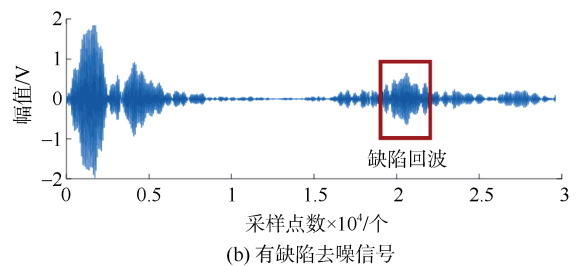
缺陷回波

图 21 锯轨前后反射波原始信号

Figure 21 Original signal of reflection wave before and after saw rail



(a) 无缺陷去噪信号



缺陷回波

图 22 锯轨前后反射波去噪信号

Figure 22 Denoising signal of reflection wave before and after saw rail

为验证去噪算法的有效性，对断轨状态去噪前后信号进行傅里叶变换，得到信号频域图如图 23 所示，从图中可以发现，经变分模态分解算法处理后的信号，低频干扰成分有效去除，较好的保留了缺陷信号成分。

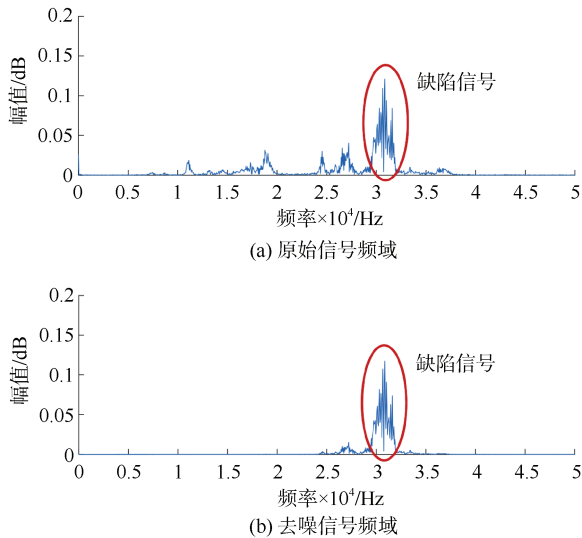


图 23 信号频域对比

Figure 23 Signal frequency domain comparison

为进一步分析缺陷信号，对去噪后信号做希尔伯特变换，得到包络信号，如图 24 所示。

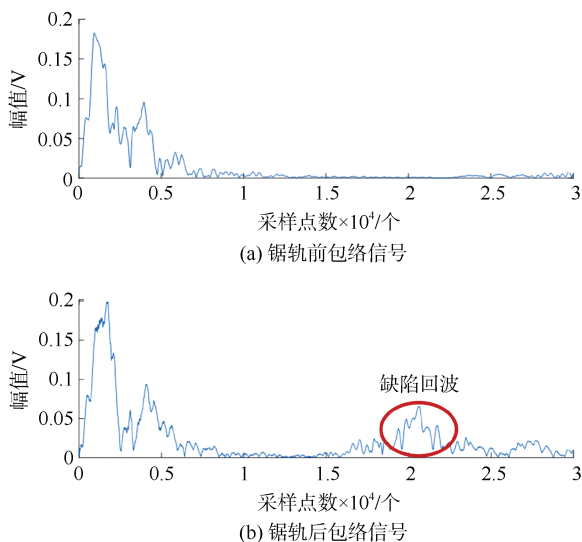


图 24 包络信号

Figure 24 Envelope signals

将锯轨前后包络信号进行作差分析，提取缺陷信号，如图 25 所示。结合采样频率、超声导波传播速度与缺陷信号的时域特征，经上位机系统分析，钢轨缺陷所处位置为 K1+178，其中 K1 表示为设备所处区间，178 为损伤所在的具体里程，实际伤损位置为 K1+180，

定位误差率为 1.1%。服务器分析缺陷信号后，向相关人员发送报警信息。

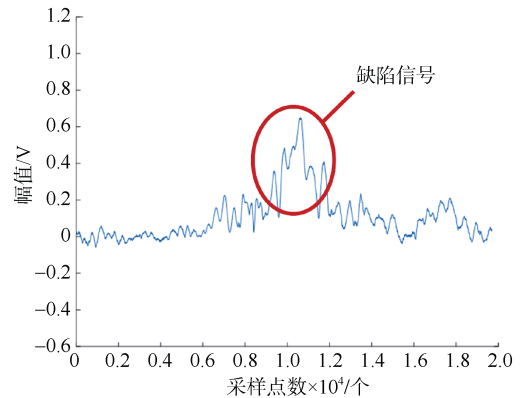


图 25 缺陷回波信号

Figure 25 Defect echo signal

3 结论

钢轨作为城市轨道交通的重要组成部分，直接关系到列车的安全运行，本次研究基于超声导波检测技术，设计了一种针对钢轨断裂检测的全天候实时在线监测系统，为满足实际检测需求，对监测系统构建进行了详细的规划，系统主要组成部分和关键技术总结如下。

1) 监测系统采用 STM32F429 芯片作为主控芯片，DTU 作为无线通信设备，搭建硬件检测电路，实现了超声导波信号的发射、接收、处理和检测数据上传。在线监测平台通过 4G 网络，实现远程指令的下发，控制下位机的工作方式，其主要组成部分为信息管理模块、数据存储模块及路段健康监测模块，相关工作人员能够在线观察钢轨的健康状况。

2) 为去除环境噪声对检测过程的干扰，根据超声导波信号的特点，引入变分模态分解方法，滤除导波信号中的噪声成分，提高检测灵敏度与检测效率。

3) 由于试验区间内设备安装期间出现断轨的概率太小，故采用人工锯轨实验的方法，在苏州地铁 5 号线换轨期间进行检测实验，验证监测系统的有效性。结果表明，在钢轨断裂深度为钢轨高度 30% 的情况下，系统报警时间为 3 min，计算定位误差率为 1.1%，为钢轨断裂监测提供了技术手段。

4 展望

超声导波监测系统结合硬件检测电路、在线监测平台和信号处理方法，实现了全天候钢轨健康状况监测，但在断裂缺陷定量研究存在不足，对此有以下改

进之处。

1) 超声导波断轨监测系统目前研究对象为钢轨早期断裂检测, 后续可以优化实验方案, 增加不同距离的钢轨断裂实验与多类别多程度的钢轨模拟损伤实验, 分析各类缺陷的导波信号特征, 实现钢轨损伤的定位定量研究, 完善超声导波断轨监测系统。

2) 超声导波断轨监测设备的有效运行依靠着各项技术的融合协作, 随着神经网络和传感器设备的高速发展, 超声导波断轨监测系统存在巨大的提升空间, 未来需进一步探索智能算法, 实现断轨的早期预警与伤损程度评估, 保障城市轨道交通的安全运行。

参考文献

- [1] 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): 1763-1780.
TIAN Guiyun, GAO Bin, GAO Yunlai, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [2] 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): 11-25.
ZHANG Hui, SONG Yanan, WANG Yaonan, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2019, 40(2): 11-25.
- [3] 李文超. 超声波检测钢轨伤损及定位研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
LI Wenchao. Study on ultrasonic detection of rail damage and location[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
- [4] MARIANI S, NGUYEN T, PHILLIPS R R, et al. Non-contact ultrasonic guided wave inspection of rails[J]. Structural health monitoring, 2013, 12(5/6): 539-548.
- [5] 任远. 基于超声导波的实时断轨检测方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2010.
REN Yuan. Research on real-time track break detection method based on ultrasonic guided waves[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2010.
- [6] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE transactions on signal processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [7] YANG Cheng, JIA Minping. A novel weak fault signal detection approach for a rolling bearing using variational mode decomposition and phase space parallel factor analysis[J]. Measurement science and technology, 2019, 30(11): 115004.
- [8] 周颖. 超声导波实时断轨检测的去噪算法[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
ZHOU Ying. De-noising algorithm for real-time rail break detection with ultrasonic guided waves[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [9] 吴云昭. 基于超声导波的钢轨长距离缺陷检测技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
WU Yunzhao. Research on long-distance defect detection technology of rail based on ultrasonic guided waves[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022.
- [10] BOMBARDA D, VITETTA G M, FERRANTE G. Rail diagnostics based on ultrasonic guided waves: an overview[J]. Applied sciences, 2021, 11(3): 1071.
- [11] 王握. 基于超声导波的钢轨缺陷检测研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WANG Wo. Research on rail defect detection based on ultrasonic guided waves[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [12] 李淑裕. 基于变分模态分解的超声导波断轨监测算法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
Li Shuyu. Research on ultrasonic guided wave track break monitoring Algorithm based on variational mode decomposition[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [13] 唐贵基, 王晓龙. 变分模态分解方法及其在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报, 2016, 29(4): 638-648.
TANG Guiji, WANG Xiaolong. Variational mode decomposition method and its application on incipient fault diagnosis of rolling bearing[J]. Journal of vibration engineering, 2016, 29(4): 638-648.

(编辑: 傅依萱)