

## 轨道故障引发的轮轨冲击特征研究\*

李修文<sup>1,2</sup> 曾承志<sup>1</sup> 杨荣华<sup>1,2</sup> 唐德尧<sup>2</sup>

(1. 唐智科技湖南发展有限公司, 410083, 长沙; 2. 北京唐智科技发展有限公司, 100038, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 通过对不同轨道故障引发的轮轨冲击进行动力学仿真研究, 得到了轨道断裂引发的冲击特征主要表现为多簇形式, 轨道内部裂纹引发的则为一簇冲击, 而轨道平直度故障引发的冲击特征为明显两簇冲击; 仿真分析了车轮转速对各类故障冲击幅值的影响。现场监测结果验证了仿真结果的正确性。

**关键词** 轨道交通; 轨道故障; 轮轨冲击特征

**中图分类号**

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.01.024

## Research on the Characteristics of Wheel Rail Impact Caused by Rail Fault

LI Xiuwen, ZENG Chengzhi, YANG Ronghua, TANG Deyao

**Abstract** Through the dynamic simulation of wheel rail impact caused by different rail faults, it is obtained that the impact characteristics caused by rail fracture are mainly in the form of multiple clusters; the impact characteristics caused by rail internal crack are one cluster; and the impact characteristics caused by rail flatness fault are evident two clusters. The influence of wheel rotational speed on the impact amplitude of various faults is simulated. Field measured data verifies the correctness of the simulation results.

**Key words** rail transit; rail fault; wheel rail impact characteristics

**First-author's address** Tangzhi Technology Hu'nan Development Co., Ltd., 410083, Changsha, China

轨道作为城市轨道交通列车的行车基础, 其质量和工作状态对整个线路及行车安全有着直接的影响。在日常运营过程中, 随着列车轮对的反复压迫和冲击, 轨道将出现垂向和横向的动态形变和永久形变<sup>[1-3]</sup>; 同时, 因受焊接材料、焊接工艺水平和养护维修等多方面因素的影响, 在车轮反复碾压作用下, 轨道焊接接头会发生低塌等病害<sup>[4]</sup>, 使得轨

道出现各种安全隐患, 严重威胁列车的运营安全性及乘客的舒适性。因此, 研究不同类型轨道故障引发的轮轨冲击响应特征, 对轨道故障诊断而言意义重大。

当车轮在有故障的轨道上运动时, 周期性的冲击会引起整个车辆、轨道系统的耦合振动, 这样不仅会缩短列车各个部件的使用寿命, 而且是造成车辆颠覆、燃轴和切轴的重要原因<sup>[5-7]</sup>。现阶段检测轨道故障的方法多种多样, 有超声波检测、声发射、微波检测、射线检测、磁粉检测和渗透检测等<sup>[8]</sup>。随着现代检测技术、计算机技术和信号处理技术的发展, 基于运营车辆的轨道检测技术也得到了发展<sup>[3]</sup>。在运营车辆上直接加装在线监测系统成为今后轨道故障检测的发展趋势。轨道在线监测技术核心在于信号处理, 因而对其故障引发的信号进行研究是轨道故障检测的基础。

本文主要针对轨道存在断裂故障、裂纹故障和表面平直度故障时的冲击特征进行研究, 通过动力学模型仿真分析各故障下的冲击特征差异, 并通过与实际测试出现的故障数据特征进行对比, 验证仿真结果的准确性, 为轨道故障主动诊断提供参考。

## 1 轨道常见故障类型

从轨道故障的宏观特征和形成机理上, 可将轨道故障分为: 核伤、纵向裂纹、螺孔裂纹、焊接接头、擦伤裂纹和水平裂纹等<sup>[9]</sup>, 其中轨道裂纹和断裂属于较为严重的故障。以上故障都能在车辆运行过程中引起强烈的轮轨冲击。若能提取并识别各类故障引起的轮轨冲击信息存在的差异, 就能对轨道状态进行诊断, 并基于相应的冲击特征确定具体的故障类型。部分常见轨道故障形态如图 1 所示。

\* 湖南创新型省份建设专项经费资助项目 (2020GK4013); 长沙市雨花区科技计划项目 (YHKJ-2018-ZG-09)

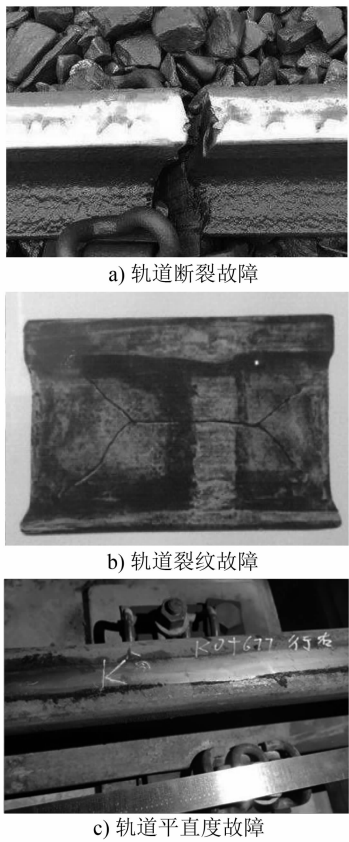


图 1 常见轨道故障形态  
Fig. 1 Common track fault patterns

2 轨道故障引发的轮轨冲击仿真分析

为研究各类型轨道故障引发的轮轨冲击信息特征,拟通过动力学建模仿真方法,对轨道存在断裂、内部裂纹和平直度这三种常见故障时的轮轨冲击信息进行分析。

2.1 轨道断裂故障引发的轮轨冲击仿真

对有缝轨道来说,接缝宽度安装时的规定为 6 mm,轨道断裂断口宽度一般大于该值(曾出现的轨道断裂的断口宽为 15 mm)。研究轨道断裂引发的轮轨冲击信息建立的模型断口宽度为 20 mm(如图 2 所示)。



图 2 轨道断裂故障仿真模型图

Fig. 2 Simulation model diagram of track break

基于图 2 的仿真模型。通过有限元显式动力学

进行计算,车轮转速在 120 r/min、240 r/min 和 450 r/min 这三种状态下的轮轨冲击信息表现如图 3 所示。

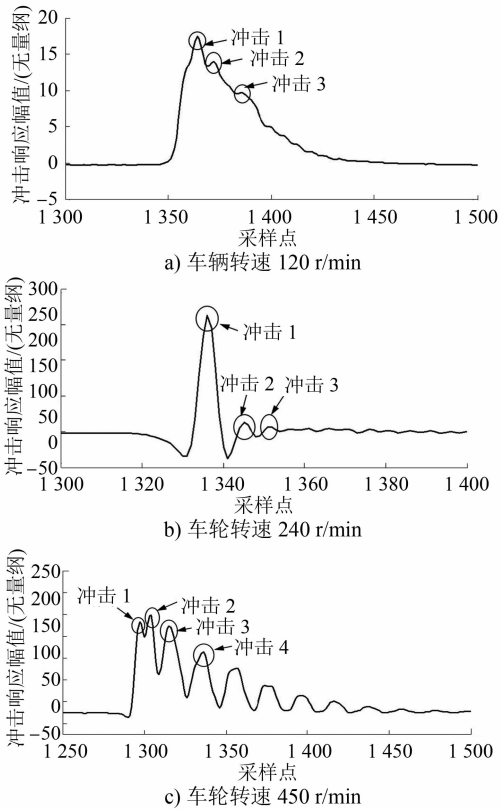


图 3 不同车轮转速下的轨道断裂仿真分析结果  
Fig. 3 Simulation analysis results of track break at different wheel speeds

图 3 所示的仿真结果表明,当轨道断裂时,所呈现的冲击特征主要表现为多簇形式(3 簇及以上)。其中:低转速下为 3 簇明显的冲击,而转速增高则进一步增至 4 簇及以上。

2.2 轨道内部裂纹故障引发的轮轨冲击仿真

轨道内部裂纹模型建立基于实际现场中出现的裂纹形态(如图 1 所示)为依据,最终建立的轨道内部裂纹模型如图 4 所示。

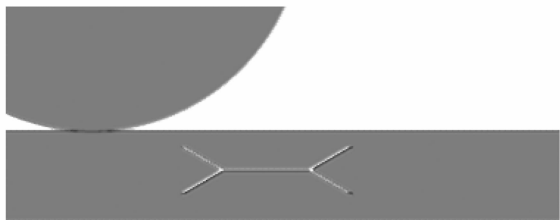


图 4 轨道内部裂纹仿真模型图

Fig. 4 Simulation model diagram of track internal cracks

同样通过仿真计算得到轨道内部裂纹时,车轮

转速在 120 r/min、240 r/min 和 450 r/min 这三种状态下的轮轨冲击信息表现,如图 5 所示。

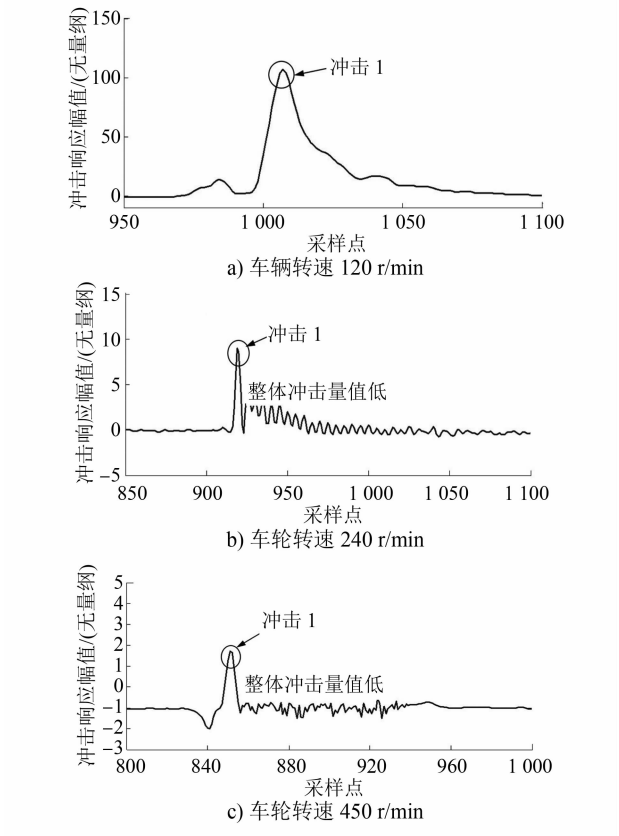


图 5 不同车轮转速下的轨道内部裂纹仿真分析结果  
Fig. 5 Simulation analysis results of track internal cracks at different wheel speeds

图 5 所示的仿真结果表明,轨道内部裂纹时,所呈现的冲击特征主要表现为簇明显的冲击。其中:车轮低转速下引起的冲击幅值高;随着车轮转速升高,冲击幅值逐渐降低。

### 2.3 轨道平直度故障引发的轮轨冲击仿真

轨道的平直度故障是轨道表面缺陷的主要表现形式。本文通过建立轨道表面存在凹特征来模拟轨道平直度故障,最终建立的轨道平直度故障模型如图 6 所示。

基于图 6 分析模型,同样通过仿真计算得到轨道存在平直度故障时,车轮转速在 120 r/min、240 r/min 和 450 r/min 这三种状态下的轮轨冲击信息表现,如图 7 所示。

图 7 所示的仿真结果表明,轨道平直度故障所呈现的冲击特征主要表现为 2 簇明显的轮轨冲击。其中:车轮低转速下产生的冲击幅值低;随着车轮转速变高,冲击幅值显著增高。

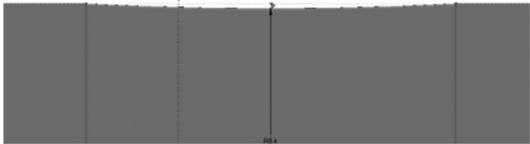


图 6 轨道平直度故障特征示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of the track flatness fault characteristics

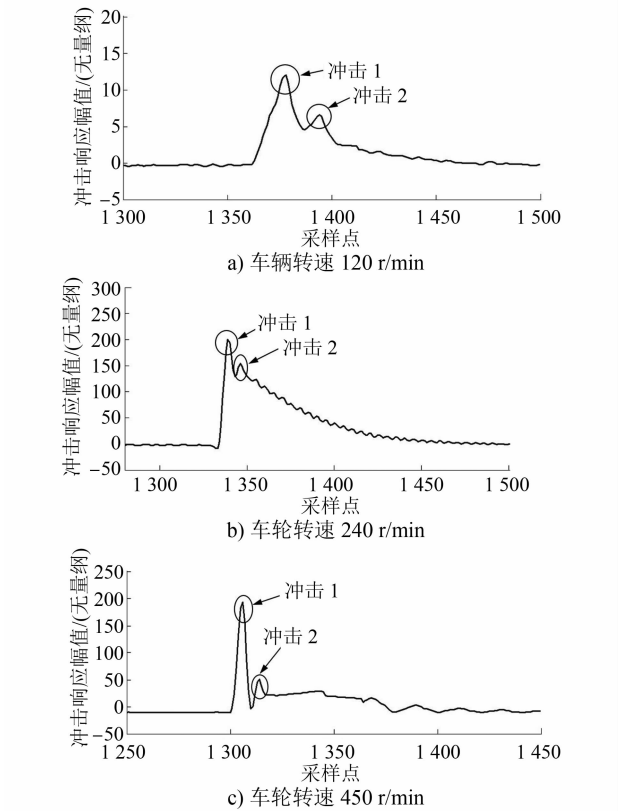


图 7 不同车轮转速下的轨道平直度故障仿真分析结果  
Fig. 7 Simulation analysis results of track flatness faults at different wheel speeds

### 2.4 轨道故障引发的轮轨冲击特征总结

通过以上仿真研究表明,不同类型轨道故障引发的轮轨冲击特征表现及幅值(见表 1)存在一定差异。具体特征总结如下:

表 1 不同车轮转速下各类型轨道故障的冲击响应最大值(无量纲)

| 车轮转速      | 轨道断裂  | 轨道内部裂纹 | 轨道平直度故障 |
|-----------|-------|--------|---------|
| 120 r/min | 52.66 | 106.90 | 12.01   |
| 240 r/min | 65.18 | 9.00   | 199.30  |
| 450 r/min | 78.85 | 1.72   | 213.52  |

1) 轨道断裂引发的轮轨冲击特征主要表现为多簇形式:轮轨转速低时,轮轨冲击表现为 3 簇;随着轮轨转速增高,冲击簇更多。产生此现象的主要原因可能为车轮经过断裂区域激发了车辆簧下部分的广义共振。

2) 轨道内部裂纹引发的轮轨冲击特征主要表现为簇冲击,且在车轮低转速下产生的冲击幅值高;随着轮轨转速升高,冲击幅值降低明显。初步认为主要原因是轨道裂纹故障时高转速下车轮迅速离开裂纹区域,裂纹导致的刚度降低还来不及对车轮产生冲击;而低转速下则能对车轮产生影响。

3) 轨道平直度故障引发的轮轨冲击特征主要表现为明显的 2 簇冲击,且车轮低转速下产生的冲击幅值较低。主要原因为车轮滚入该区域及滚出该区域将分别产生冲击。

### 3 现场轨道故障冲击数据验证分析

为验证上述仿真分析中轨道故障引发的轮轨冲击特征的有效性,选择了两条安装有轨道监测功能设备的线路进行相应的数据分析,其中一条线路的轨道为有缝轨道,另一条线路的轨道为无缝焊接轨道。为了便于确定轨道故障的公里标位置和适用车速变化情况,采用的数据采集方式为转速跟踪采样。本试验的采样频率为 200 点/圈,即车轮每旋转一周,等旋转角度采集 200 个数据点。

#### 3.1 轨道断裂冲击数据验证分析

图 8 和图 9 为有缝轨道线路同一公里标位置的两组不同行车趟次的冲击数据。对于有缝轨道,车轮正常运行时,在两根轨道的接缝处均会产生较大的冲击信号,且该冲击表现为一簇明显的窄脉冲。图 8 和图 9 中,除一簇窄脉冲之外,还存在明显的多簇冲击特征信息,表明其是非正常轨道接缝引起的冲击信息,从特征上看,疑似轨道断裂引发的冲击信息。

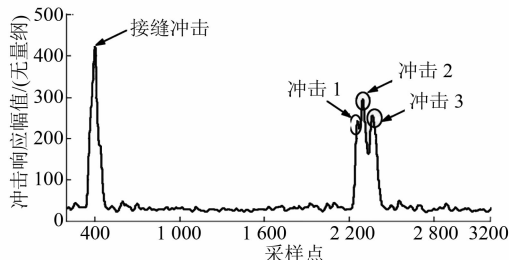


图 8 某线下行线 B272+60 km 处疑似轨道断裂数据一  
Fig. 8 Suspected track fracture data No.1 of a certain line B272+60 km

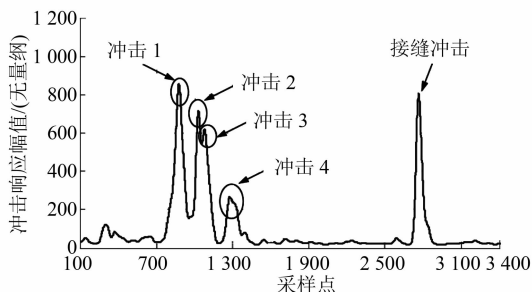


图 9 某线下行线 B272+60 km 疑似轨道断裂数据二  
Fig. 9 Suspected track fracture data No.2 of a certain line B272+60 km

现场工务人员检查反馈,该公里标位置确为轨道接缝区域,且其宽度发生了明显变化,达到 15 mm(正常应在 6 mm),相当于形成了类似轨道断裂的特征,故障照片如图 10 所示。同时通过采样点数计算,接缝冲击与多簇冲击之间间距大约为 25 m,符合实际情况,进而验证了仿真轨道断裂引发的冲击特征表现。

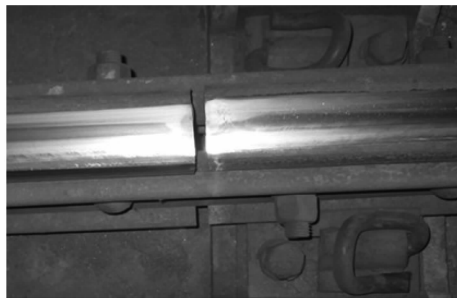


图 10 轨道接缝宽度超标形成的类似断裂照片  
Fig. 10 Photos of the similar fractures caused by excessive track joint width

#### 3.2 轨道平直度故障冲击数据验证分析

图 11 和图 12 为无缝焊接轨道线路检测得到的两组冲击数据。从图 11 和图 12 中均可看到一簇焊缝冲击信息,另外还有疑似轨道平直度故障引发的

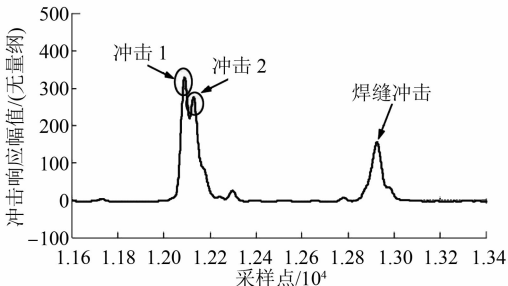


图 11 某线下行线右轨 K1+702 km 疑似平直度故障数据  
Fig. 11 Data of suspected flatness fault on the right track K1+702 km of a certain line

的明显两簇冲击特征信息。

通过现场工务人员勘查轨道状态确认,在该线下行线右轨和左轨 K1+702 km 处均存在焊缝平直度故障,故障照片如图 13 所示,进而验证了仿真轨道平直度故障引发的冲击特征表现。

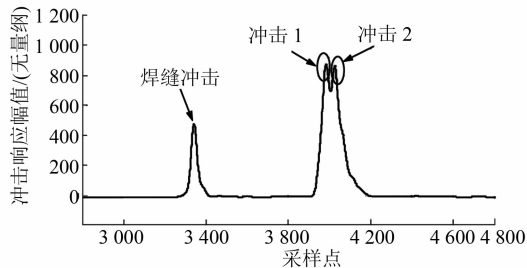


图 12 某线下行线左轨 K1+702 km 疑似平直度故障数据

Fig. 12 Data of suspected flatness fault on the left track K1+702 km of a certain line



a) 左轨

b) 右轨

图 13 某线下行线右轨和左轨 K1+702 km 处焊缝平直度故障照片

Fig. 13 Photos of the welding seam flatness fault on the right and left rails K1+702 km of a certain line

通过以上实际线路试验故障冲击数据特征表现验证了动力学仿真中部分轨道故障(轨道断裂和轨道平直度故障)引发的冲击特征的准确性。

## 4 结语

本文通过对常见轨道故障的动力学仿真研究,初步得到了各类轨道故障引发的冲击特征表现,并基于实际试验数据对部分仿真冲击特征进行了验证。

1) 通过动力学仿真计算,对轨道断裂、内部裂纹和轨道平直度这三种故障引发的冲击特征进行了总结。其中:轨道断裂引发的冲击特征主要表现为多簇形式,轨道内部裂纹引发的则为一簇冲击,而轨道平直度故障引发的冲击特征为两簇冲击。

2) 通过现场实际试验冲击数据分析,验证了轨道断裂故障和轨道平直度故障时的冲击信息表现,与仿真结果基本一致。

3) 本文提出的基于轮轨冲击特征的识别诊断

方法,可为后续轨道故障检测识别提供参考。

## 参考文献

- [1] 杨永平,边颜东,周晓勤,等. 我国城市轨道交通存在的主要问题及发展对策[J]. 城市轨道交通研究,2013(10):1.  
YANG Yongping, BIAN Yandong, ZHOU Xiaoqin, et al. Problems and development strategy of urban rail transit in China[J]. Urban Mass Transit, 2013(10):1.
- [2] 黄贵发,王定晓,唐德尧. 用于城市轨道交通车辆走行部故障的车载在线实时诊断与监测系统[J]. 城市轨道交通研究,2015(9):31.  
HUANG Guifa, WANG Dingxiao, TANG Deyao. On-line real-time fault diagnosis and monitoring system for urban rail transit vehicle bogie[J]. Urban Mass Transit, 2015(9):31.
- [3] 高建敏,翟婉明. 高速铁路钢轨焊接区不平顺的动力效应及其安全限值研究[J]. 中国科学:技术科学,2014(7):697.  
GAO Jianmin, ZHAI Wanming. Dynamic effect and safety limits of rail weld irregularity on high-speed railways[J]. Scientia Sinica Technologica, 2014(7):697.
- [4] 张克平,石广田,和振兴,等. 曲线段钢轨焊接接头不平顺对轮轨动力响应的影响研究[J]. 城市轨道交通研究,2019(9):32.  
ZHANG Keping, SHI Guangtian, HE Zhengxing, et al. Influence of irregularity welding joints of curved segment rails on wheel/rail dynamic interaction[J]. Urban Mass Transit, 2019(9):32.
- [5] 刘蕴辉,刘铁,王权良,等. 基于图像处理的铁轨表面缺陷检测算法[J]. 计算机工程,2007(2):59.  
LIU Yunhui, LIU Tie, WANG Quanliang, et al. Rail surface defects detection algorithm based on image processing[J]. Computer Engineering, 2007(2):59.
- [6] 谢毅,肖杰. 高速铁路发展现状及趋势研究[J]. 高速铁路技术,2021(2):23.  
XIE Yi, XIAO Jie. Research on high-speed railway development status and trend[J]. High Speed Railway Technology, 2021(2):23.
- [7] 邢丽贤. 提速条件下钢轨伤损特点及钢轨伤损分类的研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2008.  
XING Lixian. Research on defect characteristics and classification of higher speed rails[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2008.
- [8] 曹芳. 数字化钢轨超声波探伤仪的研究与开发[D]. 沈阳:东北大学,2008.  
CAO Fang. The research and development of rail digital ultrasonic flaw detector[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [9] 魏强. 车辆-基于振动信号的钢轨伤损检测方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
WEI Qiang. Studies of the rail defect detection method based on vibration signals[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

(收稿日期:2020-02-21)